

2011年度 修士学位論文

BelleII 検出器の衝突点ビームパイプ内面で散乱されたシンクロトロン光の振る舞いの検討

奈良女子大学大学院人間文化研究科
物理科学専攻 高エネルギー物理学研究室
村上 潤

2012年 3月 31日

目次

1	はじめに	9
2	Bファクトリー実験の高度化	10
2.1	SuperKEKB 加速器	10
2.1.1	ルミノシティ	10
2.1.2	ナノビーム法	12
2.1.3	最終収束電磁石システム	12
2.2	BelleII 検出器	13
3	加速器・衝突点とビームバックグラウンド	18
3.1	衝突点付近の設計	18
3.1.1	ビーム交差角	18
3.1.2	ビーム衝突点付近のビームパイプ	19
3.1.3	衝突点付近の2股構造	20
3.2	検出器バックグラウンド	21
3.3	シンクロトロン放射	23
3.3.1	原理	23
3.3.2	放射エネルギー	23
3.3.3	KEKB でのシンクロトロン放射の影響	24
3.3.4	SuperKEKB でのシンクロトロン放射の影響	24
3.3.5	SuperKEKB でのシンクロトロン放射への対策	26
3.3.6	シミュレーションの現状	28
4	シンクロトロン放射光の反射率測定	30
4.1	シンクロトロン放射光テストの目的	30
4.2	セットアップ	30
4.2.1	X線源	30
4.2.2	X線照射ターゲット	32
4.2.3	X線検出器	32
4.2.3.1	本実験で使うAPDの検討	33
4.2.4	自動ステージ	34
4.2.4.1	座標軸の定義	35
5	実験 1:X線発生装置でのテスト	41
5.1	目的	41
5.2	第一回目 X線発生装置でのテスト	41
5.2.1	X線発生装置が使えるかの検討及びAPDの動作確認	41
5.2.2	アライメント	43
5.2.3	角度分布	44
5.2.4	考察	45
5.2.5	実験手順のまとめ	46
5.2.6	まとめ	47

5.3	第 2 回目 X線発生装置でのテスト	47
5.3.1	全反射の条件での測定	47
5.3.2	CAMAC でのカウント数の測定	48
5.4	まとめ	52
6	実験 2: Photon Factory でのビームテスト	53
6.1	目的	53
6.2	セットアップ	54
6.3	X線を当てた時の様子	54
6.4	アライメント	55
6.5	測定結果	56
6.6	考察	57
6.7	PF をふまえた X線発生装置での考察と PF との比較とシミュレーション結果からの評価	63
6.8	tip-scattering の結果を SR シミュレーションに入れるためのまとめ	65
6.8.1	単位の定義と求める量	65
6.8.2	Photon Factory の結果	66
6.9	まとめ	66
7	まとめ	67
	付録 A 壁電流	69
	付録 B HOM エネルギー	69
	付録 C 光子と物質の反応	69
	付録 C.1 光電効果	69
	付録 D 半導体検出器	70
	付録 D.1 半導体検出器の仕組み	70
	付録 D.2 APD 概要	70
	付録 D.3 種類	72

目 次

1	SuperKEKB 加速器	11
2	通常の正面衝突 (左) とナノビーム方式 (右) の比較	13
3	QCS の配置図	13
4	LER 用 QC1 の試作機	14
5	BelleII 測定器	14
6	PXD2 層と SVD4 層の配置図	15
7	ピクセル検出器概念図	16
8	1 番上の図は Belle 測定器の全体図である。2 番目の図は 1 番目の赤色部分を拡大したものである。3 番目の図は BelleII の 2 番目と同じ場所の図である。	18
9	KEKB と SuperKEKB の最終収束電磁石、上図が KEBB 時、下図が SuperKEKB 時の様子である。KEKB と SuperKEKB では大きく交差角が違うことが分かる。また、KEKB 時は QCS を上下流共有していたが、SuperKEKB では独立の QCS をもつ。	19
10	衝突点付近のビームパイプの素材の様子	20
11	SuperKEKB のビームパイプ (2 股部分) を半割にした時の様子	21
12	上流の四極電磁石で発生するシンクロトロン放射の様子を GEANT4 を用いてシミュレーションした結果、左図の赤丸はビームパイプの領域を示している。右図は、横軸が発生したシンクロトロン放射のエネルギー、縦軸は photon 数である。	25
13	ビームパイプ内側から Au を通り抜け出てくる photon のシミュレーションのためのセットアップ	25
14	photon がピクセル検出器または金に入った時の透過率とエネルギーの関係	26
15	衝突点付近のデザイン	27
16	コリメーターを置いたときのシミュレーション結果。黒丸はビームパイプの径を表しており、ビームパイプからはみ出た photon に注目している	27
17	ridge 構造の成り立ち。上の図のようにまず 1 つ ridge をつくり、そのあと、2 つ目を作っていく、シンクロトロン光がベリリウムパイプに入射しないように作られている。	28
18	アルミによる ridge 構造のモックアップ (左側から赤色レーザー光を ridge 部分に当てている)	28
19	X 線発生装置	31
20	実験で使うタンタルの設計図	33
21	実験で使うタンタル片。厚さ 3 mm、30 mm 四方のタンタル板の片面に、高さ 1mm の”ridge 構造”を施した出っ張りが作ってある。放射光を当てる面には、100 μm の金メッキが施してある。	33
22	APD 周辺回路図	34
23	リバース型 APD に Na(511 keV) を当てた時のオシロスコープでの出力	34
24	リーチスルー型 APD に Na(522 keV) を当てた時のオシロスコープでの出力	35
25	座標軸の説明のためのセットアップ図	36
26	座標軸の説明のための概念図、ここではステージを上から見ている	36
27	θ 軸のための自動ステージである ϕ 軸ステージ	37
28	タンタル片が X 線に当たっていないの時の θ 角を動かした様子	37

29	タンタル片がX線に当たり始めた時の θ 角を動かした様子	37
30	図 28 で予想されるグラフの形	38
31	図 29 で予想されるグラフの形	38
32	X線 beam が何にも干渉されず、まっすぐ来た時の $\theta=0$ 度の場所を表したもの	38
33	Y軸のステージ。左図はY軸のみの自動ステージの写真である。右図はY軸に α 軸を固定した写真である。	38
34	タンタル片がX線に当たっていないの様子 (1)	39
35	タンタル片がX線に当たり始めた様子 (2)	39
36	タンタル片がX線に完全に当たっている様子 (3)	39
37	図 34=1、図 35=2、図 36=3 で予想されるグラフの形	39
38	α 軸調整用の手動ステージ	40
39	α 軸調整用の自動ステージ	40
40	α 軸マイナスの時の様子	41
41	α 軸がX線と平行の様子	41
42	α 軸プラスの時の様子	41
43	図 40 時の予想されるグラフ	41
44	図 41 時の予想されるグラフ	41
45	図 45 時の予想されるグラフ	41
46	X線発生装置でのセットアップの様子	42
47	鉄線源 (5.9keV) を置いたときのオシロスコープの様子	42
48	X線発生装置 (17keV) のX線を見たとき	43
49	X線発生装置のビームのプロファイル。横軸は θ 角度、縦軸はAPDのカウントレート。	44
50	α 角決定のために、 θ 軸を0点に固定し、Y軸を動かした時のAPDのカウントレートの変化。グラフの色の違いは α の角度の違いを示す。横軸はYの位置、縦軸はAPDのカウントレート。	45
51	横軸は α の角度、縦軸はYを変化させたときのそれぞれの立下りと立ち上がりの中点。この図から、Y変化時の中点が最小になる時の α 角がX線とタンタル接地面が平行となった α 角とする。	45
52	タンタルを接着した時のY位置ごとの変化	46
53	Yの位置を変化させていったときの θ 角度分布。横軸が角度、縦軸はAPDのカウントレートである。青色はタンタルなしでの角度分布であり、その他は順次Yの値を変化させていったときの分布である。	46
54	タンタルのtip部でない平面にX線を照射した時のYの位置を決定するための測定。横軸はYの位置、縦軸は角度である。	48
55	タンタルのtip部でない平面にX線を照射した時の角度分布。横軸は角度、縦軸はAPDのカウントレート。青色はタンタルなしでの角度分布であり、その他は順次Yの値を変化させていったときの分布である。	48
56	tipのある状態でのタンタル片にX線を照射した時の様子。横軸は角度、縦軸はビーム0点でのピーク値を1としたときの割合。青色はタンタルなしでの角度分布であり、そのほかは順次Yの値を変化させていったときのグラフである。	49

57	tip 部がないときのタンタル片に X 線を照射した時の様子。横軸は角度、縦軸はビーム 0 点でのピーク値を 1 としたときの割合。青色はタンタルなしでの角度分布であり、そのほかは順次 Y の値を変化させていったときのグラフである。	49
58	データ取得のための PC などの様子	50
59	tip 部のある状態でのタンタル片に X 線を照射した時 Y の様子。横軸は Y の位置、縦軸はカウントレートである。この時 θ 軸は 0 点に固定し Y 軸を動かしている。 .	50
60	tip 部がないときのタンタル片に X 線を照射した時の様子。横軸は Y の位置、縦軸はカウントレートである。この時 θ 軸は 0 点に固定し Y 軸を動かしている。	51
61	tip 部に X 線を照射した時の θ 角の APD カウントレートの様子。横軸は角度、縦軸はカウントレートである。青色はタンタルに X 線が照射されていない状態で、順次 Y の位置を変えたときのグラフである。	51
62	tip 部がない平面部分に X 線を照射した時の θ 角の APD カウントレートの様子。横軸は角度、縦軸はカウントレートである。青色はタンタルに X 線が照射されていない状態で、順次 Y の位置を変えたときのグラフである。	52
63	tip 部があるときとないときの X 線の様子。tip 部ありとなしのどちらも広がったビームは、タンタルでとめられ APD に入るカウントレートは θ のマイナス側では減少する。	52
64	APD をビーム 0 点に固定し Y 軸を動かした時の X 線のカウントレートの様子。この場合の左図の状態は APD を固定して、Y 軸を動かした時の様子である。右図は、左図のそれぞれの状態を横軸 Y 位置、縦軸カウントレートとしグラフ化したものである	53
65	θ 軸を回転させたときの X 線と APD の様子。この場合の左図の状態は Y 軸を固定し θ 軸を変化させた時の様子である。右図は左図のそれぞれの状態を横軸角度、縦軸カウントレートとしグラフ化したものである。	54
66	ハッチの中のセットアップの様子	54
67	ハッチの外の様子	54
68	APD に X 線 (10 keV) を照射した時のオシロスコープの様子	55
69	PF でのビームのプロファイル。この時、タンタルは X 線に照射されていない位置にあり、 θ 軸を回転させたときの APD のカウントレートを見ている。横軸は角度、縦軸はカウントレートである。	55
70	α 角決定のために、 θ 軸はビーム 0 点に固定し、Y 軸を動かした時の APD のカウントレートの変化。グラフの違いは、 α の角度の違いを示している。横軸は Y の位置、縦軸は APD のカウントレートである。	56
71	tip 部のある状態でのタンタル片に X 線を照射した時の Y の位置とカウントレートの様子。この時、 θ 軸は 0 点に固定し、Y 軸を動かしている。横軸は Y の位置、縦軸は APD のカウントレートである。	57
72	tip 部分に X 線を照射したときの θ 角を回転させたときの APD のカウントレートの様子。黒色はタンタルに X 線が照射していない状態である。以下 Y 位置を順次変えたときのグラフである。横軸は角度、縦軸はカウントレートである。	58
73	タンタル平面部分へ X 線を照射した時の Y の位置とカウントレートの様子。このとき θ 軸は 0 点に固定し Y 軸を動かしている。横軸は Y の位置、縦軸は APD のカウントレート。	58

74	タンタル平面部に X 線を照射し、 θ 角を回転させた時の APD のカウントレートの様子。黒色はタンタルに X 線が照射していない状態である。以下 Y 位置を順次変えたときのグラフである。横軸は角度、縦軸はカウントレートである。	59
75	ビームを蛍光板に写した様子。うすくビームがうつし出されている。	60
76	図 72 の左部分。横軸は角度、縦軸はカウントレートを log にしたもの。右図の絵の時の A P D 位置での様子を表す	60
77	図 72 の右部分。横軸は角度、縦軸はカウントレートを log にしたもの。右図の絵の時の A P D 位置での様子を表す	61
78	図 74 の左部分 (Y 軸を log スケールにしたもの)	62
79	図 74 の右部分 (Y 軸を log スケールにしたもの)	63
80	シンクロトロン放射が A から D に当たった場合の反射角を調べるためのセットアップ	64
81	タンタル試験片の tip 部に photon が入射したときの概念図	66
82	p-n 型半導体のバンド構造	71
83	半導体検出器の構造	71
84	APD の 3 つの異なる内部構造図。(a) 斜めエッジ型 (b) リーチスルー型 (c) リバー ス型	72

表 目 次

1	KEKB と SuperKEKB のビームパラメーター比較	12
2	ビームパイプによる放射光の阻止率	26
3	図 72 におけるそれぞれのタンタルの位置での APD(0.62 度の位置で) のカウント レート	62

1 はじめに

現在の素粒子物理における喫緊の課題である新しい物理を含む崩壊事象の観測を目指し、BelleII 実験が 2015 年からスタートする。BelleII 実験では、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の電子・陽電子衝突型加速器 SuperKEKB を用いて、大量の B 中間子を発生させる。新しい物理の発見に十分なデータ量を得るために、現行の KEKB 加速器の 40 倍のルミノシティの実現を目指している。しかしルミノシティ向上に伴い、加速器からのバックグラウンドが検出器に及ぼす影響が問題となる。本研究では特に衝突点付近におけるシンクロトロン放射光の影響を考える。

SuperKEKB ではルミノシティ向上のため、ナノビーム法と呼ばれる方法を採用する。このため、ビーム交差角が大きくなり、KEKB では最終収束電磁石を電子・陽電子ビームで共有していたが、SuperKEKB ではそれぞれ独立した最終収束電磁石を置くことが可能になった。しかし、最終収束電磁石からのシンクロトロン放射光が衝突点に最も近い検出器であるピクセル検出器 (PX) のバックグラウンドソースとなりえる。5-20 keV のシンクロトロン放射光がビームパイプの直線部分に当たり、ベリリウム部分を貫通して PX に入ると、粒子トラックの信号への雑音になるからである。このシンクロトロン光を止めるために 2 つ対策が考えられている。

1 つ目は、入射側のコリメーションである。すなわち、シンクロトロン放射が衝突部の直線部に入り込まないようにするため、ビームパイプの内径を 9 mm まで小さくする。これによりビーム衝突部の直線部分に、直接当たらないように防ぐことができる。

2 つ目は、コリメーション部分に当たったシンクロトロン光が散乱されてビームパイプの直線部分にあたる影響を改善するために考えられた”ridge 構造”である。これは鋸歯状のギザギザをビームパイプのコリメーション部分に作ることで山の斜面に当たって、反射または散乱したシンクロトロン光がビームパイプの直線部分に当たることを防ぐものである。ただし、山の頂点にあたって tip-scattering する放射光に関しては完全に防ぐことができない。tip-scattering に関しては、物質の表面の粗さに依存するため、シミュレーションでは再現することが難しい。したがって、本番で使用するビームパイプの表面と同様の表面を再現した試験片に X 線を照射する実験を行い、X 線の散乱の様子を詳しく調べ、シミュレーションへのフィードバックを行うことが肝要である。

本研究では、ビームパイプの実物を模した試験片に対して X 線照射実験を X 線発生装置で 2 回、PhotonFactory で 2 回を行い、散乱光の角度分布を測定した。第 2 章では B ファクトリーの高度化について述べ、第 3 章でビーム衝突点付近の設計とバックグラウンドについて述べる。第 4 章では、反射率測定をするために使用した、X 線源、タンタル試験片、X 線検出器、実験での座標軸について述べる。第 5 章で X 線発生装置での X 線照射実験の結果、第 6 章で PhotonFactory での X 線照射実験の結果について述べる。最後に第 7 章をまとめとする。

2 Bファクトリー実験の高度化

2010年6月、電子・陽電子衝突型加速器を用いて行った Belle 実験は、多くの成果を残し、終了した。Belle 実験はB中間子の崩壊における CP 対称性の破れを詳細に測定し、標準モデルに導入された小林・益川理論の検証を行うことを目的として1999年より、茨城県つくば市にある高エネルギー研究機構(KEK)において開始した実験である。電子・陽電子衝突型加速器である KEKB 加速器を用いてB中間子を大量に生成し、KEKB 加速器上の衝突点に設置された Belle 検出器を用いてB中間子の崩壊過程を精密測定する。これにより、2001年には、中性B中間子 (B^0 または \bar{B}^0) の J/ψ と K^0 への崩壊過程で大きく CP 対称性が破れていることを発見し [1] [2]、小林・益川理論を証明した。その他にも、X(3872) [3] の発見や、D中間子と反D中間子の混合の発見 [4] 等、様々な成果を上げた。

現在、Belle 実験の後継実験として、2015年から BelleII 実験の開始を予定している。Belle 実験では新しい物理の関与を示唆する結果がいくつも得られているが、これに明確な結論を得るためには、 10 ab^{-1} 以上の積分ルミノシティに基づく詳細な解析が必要である。また4つのクォークからなると考えられる新しい種類の共鳴状態の発見もなされているが、 10 ab^{-1} のデータ蓄積があればスピンやパリティといった量子数を決定して、このような多クォーク状態の解明も可能となる。よって、これらの目的で 50 ab^{-1} のデータ蓄積を目標として、加速器と検出器の高度化を図る。

2.1 SuperKEKB 加速器

加速器(図1)では、現在の40倍のビームルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を目指すため、「ナノ・ビーム方式」に基づいた全面的改造を施す。具体的には、衝突点における垂直方向のビームサイズを50-60 nm に絞り込み、同時にビーム電流を現在の約2倍に増加することによって、目標値を実現する計画である。2015年の実験開始から、6年程度で 50 ab^{-1} を累積することを目標としている。ルミノシティの向上に伴い、多くのビームバックグラウンドが問題となる。

2.1.1 ルミノシティ

ルミノシティ(L)とは、衝突型加速器における粒子同士の衝突頻度のことである。SuperKEKB 加速器は電子と陽電子を衝突させる加速器で、電子や陽電子は数千億個のかたまり(バンチ)同士が衝突点(Belle測定器の中心)で衝突する。ルミノシティをあげることでより多くの物理事象を観測できる。

加速器のパラメータでは、ルミノシティは以下の式 [9] でよくあらわされる。

$$L = \frac{\gamma_{\pm}}{2e\gamma_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*}\right) \left(\frac{I_{\pm}\xi_{y\pm}}{\beta_{y^*}}\right) \left(\frac{R_L}{R_y}\right) \quad (1)$$

γ_{\pm} : Lorentz factor

e : 電子の電荷量

γ_e : 古典電子半径

$\frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*}$: 衝突点での x 方向と y 方向のビームサイズ比

I_{\pm} : ビーム蓄積電流値

$\xi_{y\pm}$: 垂直方向のビームビームパラメーター

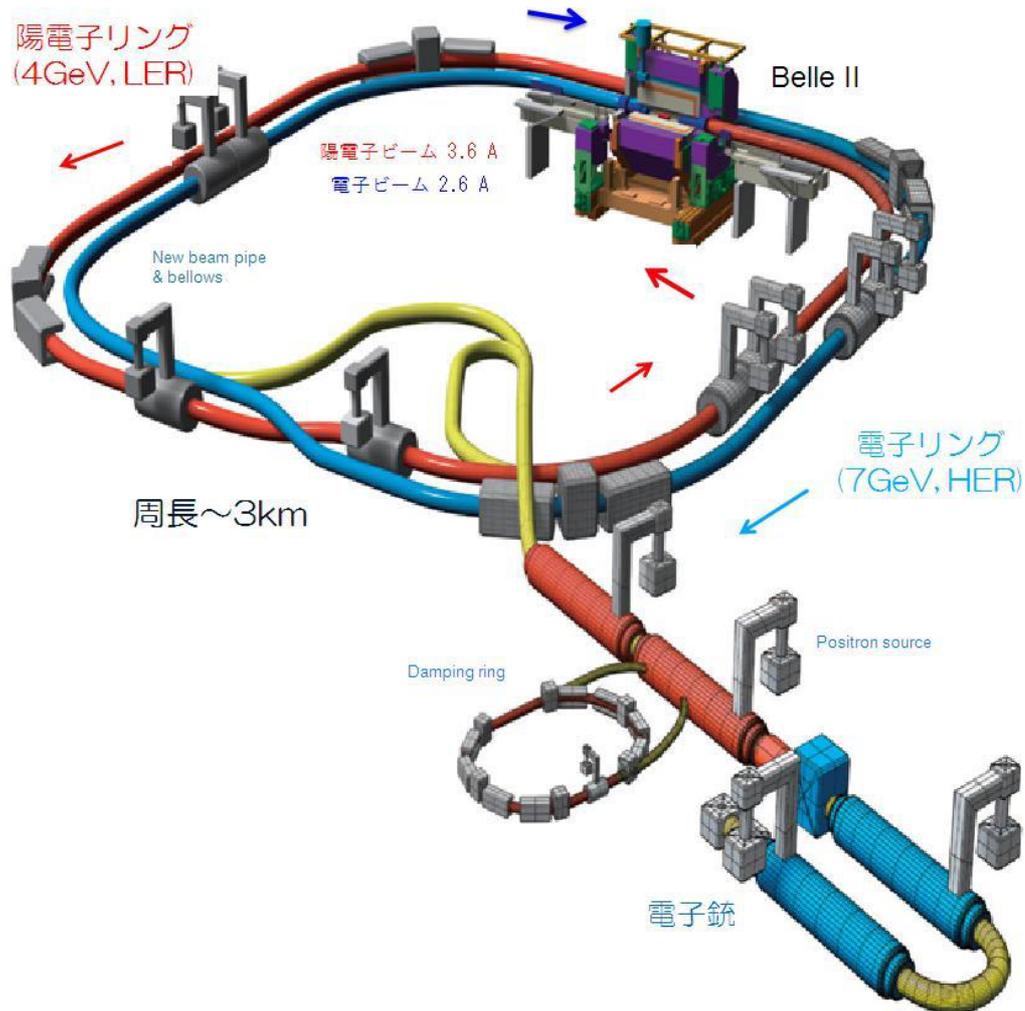


図 1: SuperKEKB 加速器

β_y^* :衝突点での垂直 β 関数

$\frac{R_L}{R_y}$:交差角などの補正係数である。

* がついているのは、衝突点付近での数値をあらわしており、 \pm は + が陽電子、- が電子ビームでの数値をあらわしている。ビームビームパラメータとは、衝突点でビームが互いに及ぼす力のことである。この 1 式からルミノシティを上げるためには電流 (I_{\pm}) 及びビームビームパラメータ ($\xi_{y\pm}$) をあげ、衝突点付近の垂直ベータ関数 (β_y^*) を小さくすればよいことが分かる。ビームビームパラメータは、はじめビーム電流の増加に伴って増加するが、ビームビーム相互作用によって同時にビームサイズも大きくなるため、ある限界値付近でそれ以上上がらなくなる。KEKB での $\xi_{y\pm}$ はほぼ、ビームサイズと電流値から考えられる限界値を達成しており、この $\xi_{y\pm}$ は SuperKEKB でも実現できると考えられている。表 1 では、KEKB と SuperKEKB のパラメータを比較している。蓄積電流 (I) は KEKB の 2 倍にする。また、 β_y^* は KEKB の 1/20 にする。これを行うとルミノシティは 40 倍になり、大きく向上する。この β_y^* を 1/20 にするために、ナノビーム法を採用する [11]。ここで、ビーム進行方向を Z、鉛直上下方向を Y、水平面上の Z と鉛直な方向を X

parameter		KEKB		SuperKEKB		units
		LER	HER	LER	HER	
Beam energy	E_b	3.5	8	4	7.007	GeV
Half crossing angle	φ	11		41.5		mrad
# of Bunches	N	1584		2500		
Horizontal emittance	ε_x	18	24	3.2	5.3	nm
Emittance ratio	κ	0.88	0.66	0.27	0.24	%
Beta functions at IP	β_x^*/β_y^*	1200/5.9		32/0.27	25/0.30	mm
Beam currents	I_b	1.64	1.19	3.6	2.6	A
beam-beam parameter	ξ_y	0.129	0.090	0.0886	0.081	
Bunch Length	σ_z	6.0	6.0	6.0	5.0	mm
Horizontal Beam Size	σ_x^*	150	150	10	11	μm
Vertical Beam Size	σ_y^*	0.94		0.048	0.062	μm
Luminosity	L	2.1×10^{34}		8×10^{35}		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

表 1: KEBB と SuperKEKB のビームパラメーター比較

とする。

2.1.2 ナノビーム法

ナノビーム方式は P.Raimondi と SuperB グループによって提案された方式 [6] であり、衝突点における垂直方向ベータ関数 (β_y^*) を KEBB よりはるかに小さい値まで絞り込むことを可能にする。

図 2 のように、水平方向のビームサイズが十分に小さいバンチ¹同士を、水平面内で大きな交差角をもって衝突させるので、バンチが重なり合う領域の進行方向の長さ (d) はバンチ長自身より圧倒的に短くなる。したがって、砂時計効果²によって妨げられずに、 $\beta_y^* \sim d$ まで垂直方向のベータ関数を絞ることができる。

d は、衝突点における水平ビームサイズ (σ_x^*) と交差角 (2ϕ) で決まり、 $d = \sigma_x^*/\phi$ である。 d を小さくするには、 σ_x^* を小さく、すなわち、水平エミッタンス (ε_x) と衝突点でのベータ関数 β_x^* の両方を小さくする必要がある。また、交差角 ϕ を大きくすることでも d は小さくなる。

2.1.3 最終収束電磁石システム

SuperKEKB では、交差角が大きくなったので、衝突点付近の β を小さく絞るため、上下流の衝突点に近い場所で電子用電子専用の最終収束電磁石を置くことができる。図 3 のように、各リング

¹高周波加速された電子ビームは、その高周波の特定の位相範囲内に集群している。このひとかたまりの電子群をバンチと呼ぶ

²光のビームはレンズを使うことでより小さくできる。それと同様に粒子ビームも 4 極磁石で収束できる。有限の長さのバンチの場合、有効に絞ることのできる範囲は限られている。これを砂時計効果 (hourglass) と呼ぶ。絞らせていない状態での衝突はルミノシティの低下を招く。

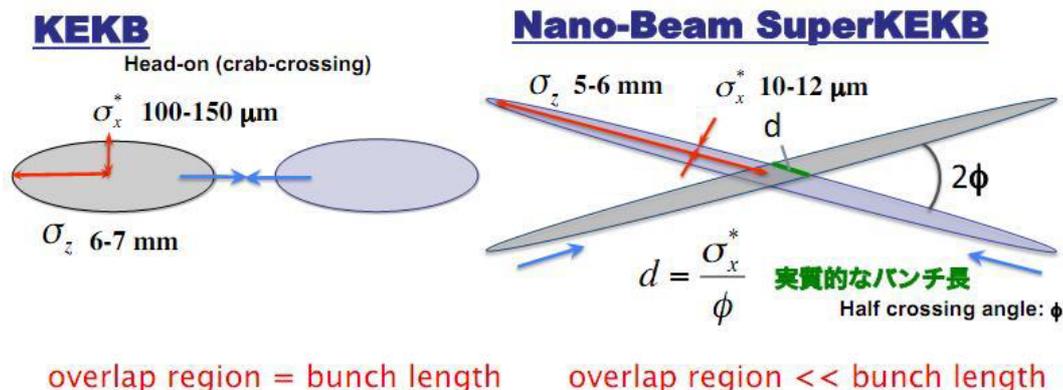


図 2: 通常の正面衝突 (左) とナノビーム方式 (右) の比較

が衝突点の上流・下流にそれぞれ 4 重極電磁石 QC1、QC2 を持つ。衝突点に近いほうの QC1 は鉛直方向の収束、遠いほうの QC2 は水平方向の収束の役割を持つ。

図 4 は QC1 の試作機であり、QCS はこのような形をしている。この QCS からでるシンクロト

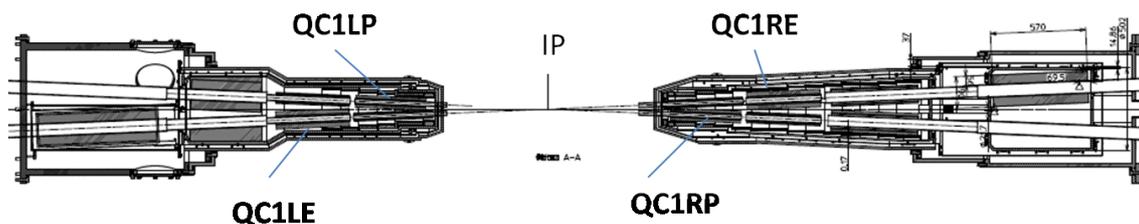


図 3: QCS の配置図

ロン放射と詳細な衝突点の設計については次の章で説明する。

2.2 BelleII 検出器

BelleII 検出器 (図 5) では、ソレノイド磁石やリターンヨークなどの大きな構造体は改造せず、再利用する一方で、粒子識別装置より内側の各測定器は完全に新しく入れ替える。特に、崩壊点位置検出の精度の向上、粒子識別能力の向上、バックグラウンド耐性の向上により、大幅な性能アップを狙う。それぞれの測定器の期待される性能を以下に述べる。 [5]

1、崩壊点位置検出器 (PXD、SVD)

これまでの B ファクトリー実験と同様、非対称エネルギーの電子・陽電子衝突と B 中間子の崩壊点位置の精密測定による崩壊時間差の決定は重要である。3.5 GeV だった、Low Energy Ring (LER) のビームエネルギーは 4 GeV、8 GeV だった High Energy Ring のビームエネルギーは 7 GeV と



図 4: LER 用 QC1 の試作機

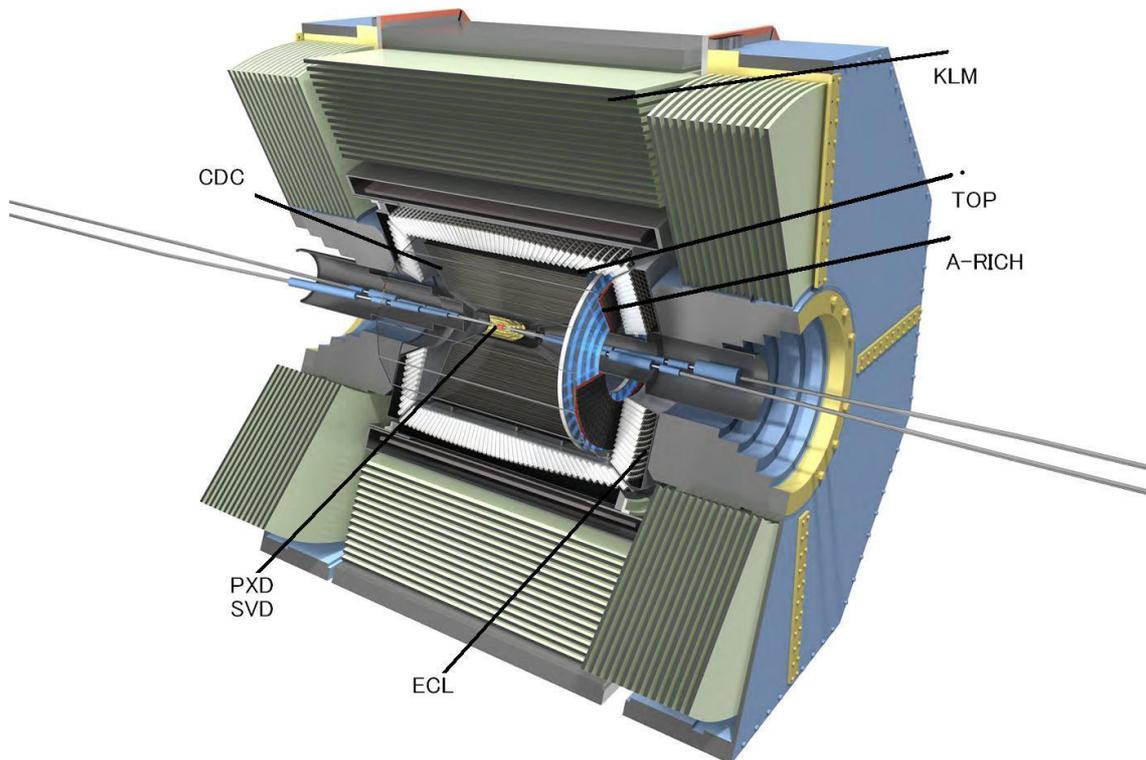


図 5: BelleII 測定器

なり、ブースト・ファクターが小さくなる一方、衝突点のビームパイプの内径は 30 mm から 20 mm へ細くなる。そのすぐ外側に新たに 2 層構造のピクセル型シリコン半導体検出器 (PXD) を設

置し、その外側に4層構造のSVDを設置することでB中間子及びそのほかの粒子の崩壊点の精密測定を目指す。これらの検出器はその外側にあるCDCとともに粒子の飛跡を検出し、運動量も測定する(図6)。

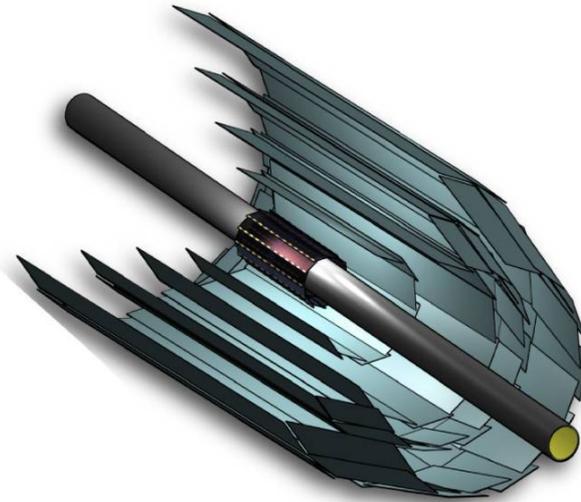


図 6: PXD2 層と SVD4 層の配置図

1、ピクセル型シリコン半導体検出器 (PXD)

Bファクトリーのエネルギーの使用に耐えることができるピクセル型センサーに、今回 DEPFET (DEpleted P-channel Field Effect Transistor) [7] を使用する。ピクセル検出器は電化製品でもよく使われる FET(電界効果型トランジスタ) を応用した検出器である。この FET はゲート電圧のみで電流を制御できる素子である。荷電粒子との反応によって空乏層で作られた電子は内部ゲートに集められる。そして外部ゲート電圧をかけることで内部ゲートに集められた電子数に比例する電流を読み出すことができる。ピクセル検出器ではこのようなピクセルが約 800 万個ある。(図 7)

このピクセル検出器の読みだしは1フレーム当たり 20 μsec かかる。それに対し、SuperKEKB では 2500 バンチが回っており、1 バンチが1周するのに 10 μsec かかる。つまり、1フレームでは 5000 バンチ交差したヒットの重ね合わせを読むことになる。ここで、ビームから来るバックグラウンドが多いとデータの識別ができないため、バックグラウンドの量が大きく影響する。図 7 にピクセル検出器の概念図をしめす。

2、シリコンバーテックス検出器 (SVD)

SVD では、Belle 時より占める領域の半径を大きくし、その外側の CDC にとってバックグラウンドが厳しい領域をカバーする。同時にこれは K_s^0 の軌跡を利用して B 中間子の崩壊点位置を決定する $B \rightarrow K_s^0 \pi^0 \gamma$ の時間に依存する CP 非保存対測定などの重要な物理解析の感度を向上するためでもある。広範囲の領域をカバーするため、大面積の両面シリコンストリップセンサーを用いるが、大面積であるため、S/N 比が悪い。これを解決するため、従来の読み出しハイブリッドをラダーの両端に置くのではなく、センサー表面に置くことで、strip capacitance を抑える。また、SVD

Depleted p-channel FET ピクセル検出器

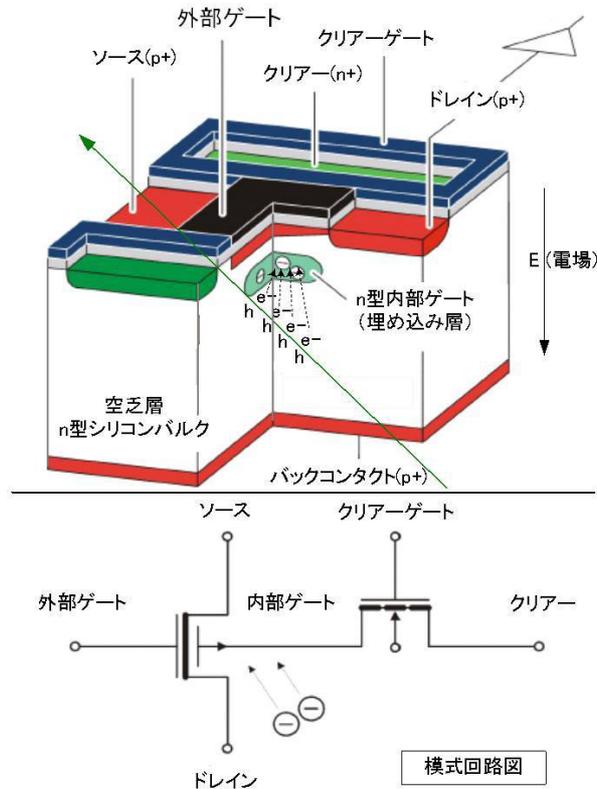


図 7: ピクセル検出器概念図

の内側に薄い PXD を崩壊点近くに置くことで、Belle に比べて大幅に衝突のパラメータが改善される。

2、中央飛跡検出器 (CDC)

粒子の飛跡測定と運動量の決定、 dE/dx 測定による粒子識別、さらには飛跡情報による level 1 トリガーを生成するため、ドリフトチェンバーを用いる。内部を $\text{He}(50\%) + \text{C}_2\text{H}_6(50\%)$ の混合ガスで満たし、多数の電極ワイヤーが張られている。BelleII では、高バックグラウンド対策として、陽極ワイヤーを陰極ワイヤーで囲んだセルと呼ばれる単位を小型化する。荷電粒子が通過する際にガスを電離し、そこから生じた電子がワイヤーまで移動する時間から、粒子の通過位置を知ることができる。

3、粒子識別装置 (TOP,A-RICH)

K 中間子と π 中間子を識別するため、現存の Belle では閾値型のチェレンコフカウンターを用いているが、BelleII では、パレル部の Time of Propagation カウンター (TOP)、エアロジェルの屈折率によるリングイメージの違いを用いたエンドキャップ部のリングイメージチェレンコフカウンター (A-RICH) を用いることで、識別の効率を高く保ったまま、誤認率を低減する。

4、電磁カロリメーター (ECL)

高エネルギーの光子や電子は十分厚い物質に入射すると、制動放射や電子対生成により電磁シャワーを生成し、そのエネルギーのほとんどを物質中で失う。このエネルギー損失を電気信号に変換して読み出して記録することが、電磁カロリメーターの役割である。BelleII では、読み出しの回路を波形サンプリング方式のものに置き換え、その時系列データをデジタル信号処理して高レートによるパイルアップを取り除く。

5、 K_L^0 muon(KLM) 検出器

測定機のもっとも外側に位置するのが K_L^0 および μ 粒子検出器である。Belle では、高抵抗平行板 (RPC) と厚さ 4.7 cm の鉄を 11 層重ねた構造になっていた。 μ 粒子は貫通力に優れているので、CDC で検出した荷電粒子の飛跡をたどったところに KLM の信号があれば、 μ 粒子だと判定できる。 K_L^0 は鉄と衝突し、強い相互作用によるハドロンシャワーを形成するので、CDC に飛跡を残さず、KLM でハドロンシャワーとして、検出される。BelleII ではビームバックグラウンドの影響が大きいと予想されるので RPC に変えてシンチレーターからの光を波長変換ファイバーに通し、高増倍率の MPPC(Multi-Pixsel Photon Counter) で読みだすシステムを導入する。

3 加速器・衝突点とビームバックグラウンド

3.1 衝突点付近の設計

SuperKEKB では、ビーム衝突点付近の設計を図 8 のように大きく変える。まず衝突点のパイプは内半径 15 mm から 10 mm へと細くなる。このことにより、PXD を新たに設置する場所ができた。また、ビーム交差角は 22 mrad から 83 mrad へと大きくなる。そして衝突点近くで 2 股に分かれる。以下で詳しく述べる。

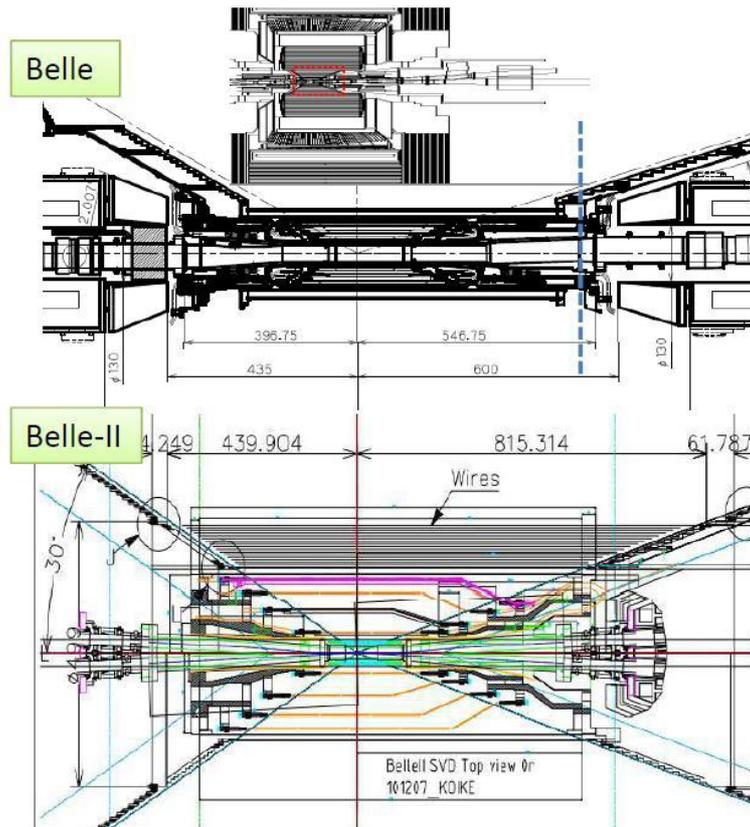


図 8: 1 番上の図は Belle 測定器の全体図である。2 番目の図は 1 番目の赤色部分を拡大したものである。3 番目の図は BelleII の 2 番目と同じ場所の図である。

3.1.1 ビーム交差角

SuperKEKB のビーム交差角は KEKB の 22 mrad より大幅に大きい 83 mrad とする。KEKB では最終収束電磁石を電子リング・陽電子リングで共有していたが、各リング専用の最終収束電磁石 (QCS) を置くために SuperKEKB では交差角を大きくし、光学調整の自由度が増した。また、KEKB では衝突点を通り抜けたビームが下流側の最終収束電磁石の中心から離れた点を通り、そこで軌道が曲げられていた。これによってディスパージョンが発生し、それを抑えられなければエミッタンスの増大につながる。したがって SuperKEKB では各リング専用の最終収束電磁

石を持つことで無用なバンドを回避し、バックグラウンドの抑制にもつなげる。図 9 は KEKB と SuperKEKB の最終収束電磁石の違いと交差角の様子を表している。

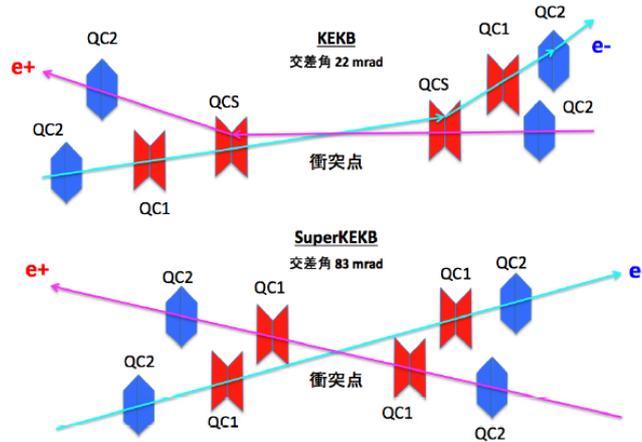


図 9: KEKB と SuperKEKB の最終収束電磁石、上図が KEKB 時、下図が SuperKEKB 時の様子である。KEKB と SuperKEKB では大きく交差角が違うことが分かる。また、KEKB 時は QCS を上下流共有していたが、SuperKEKB では独立の QCS をもつ。

3.1.2 ビーム衝突点付近のビームパイプ

図 11 は、SuperKEKB の衝突点付近のビームパイプの現在のデザインである。衝突点の前方 5 cm から後方 3 cm 部分は、測定器のアクセプタンス部分であるので、衝突点から出てきた粒子を止めないように軽い物質の素材（ベリリウム）を用いる。直線部分で発生する熱エネルギーは主に壁電流（付録 A）によるもので、80 W 程度であり、これをベリリウムの 2 重管の間にパラフィン流すことで冷却する。パラフィンの冷却能力は、10 の温度を上げるための熱量が約 270 W と見積もっており、発生する熱を十分に冷却できると考えられている。KEKB 時には、衝突点ビームパイプの直線部分はベリリウムで作ったが、SuperKEKB では直線部分の検出器アクセプタンスの外側にはチタンを用いる（図 10）。ビーム交差角が大きくなったことで、2 股部分が直線部からすぐに始まるため、接合部分の形状が複雑になり、直線部分を全てベリリウムで工作することが難しいからである。当初の設計ではチタンではなくステンレスを用いる予定であったが、ベリリウムとの熱膨張係数の差による接合部分への応力が問題となることが判明したため、熱膨張係数がベリリウムに近いチタンを用いることにした。ベリリウムとチタンの接合はろう付けで行う。また、シンクロトロン放射光を吸収するためにパイプの内側は 10 μm の金メッキを行う。これは原子番号の大きい金属ほど光電吸収（付録 C.1）によってシンクロトロン放射で生じる低いエネルギーの X 線を有効に止めることができるからだ。図 10 は衝突点付近のビームパイプの形と素材を表したものである。

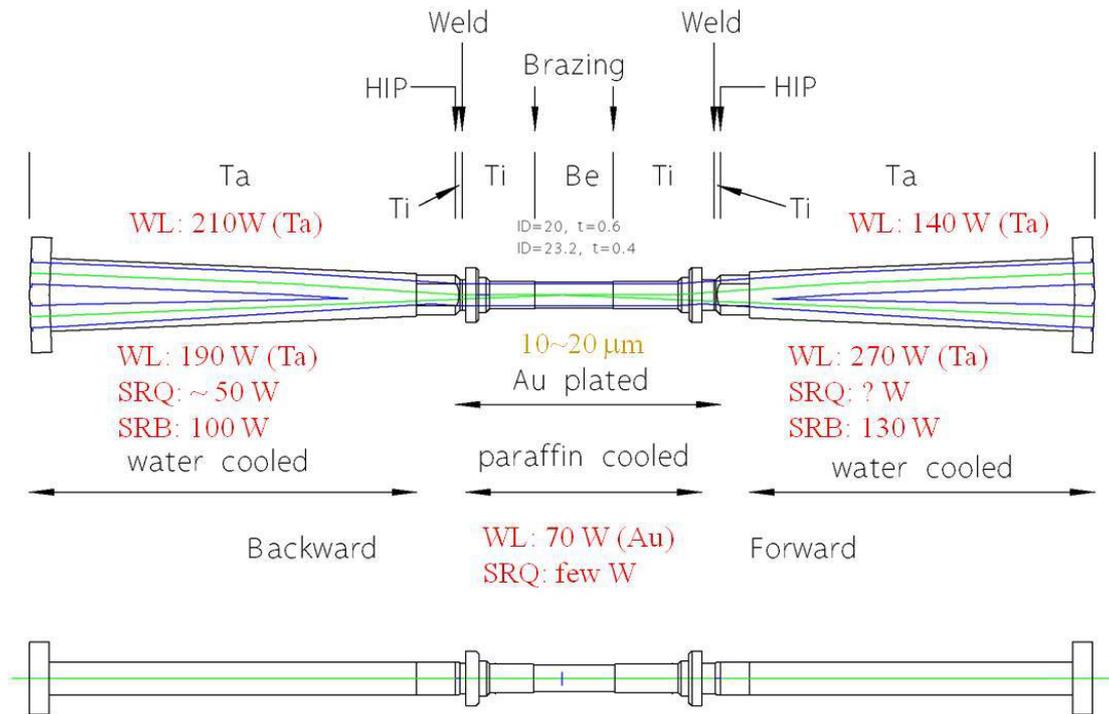


図 10: 衝突点付近のビームパイプの素材の様子

3.1.3 衝突点付近の 2 股構造

直線部に続く二股部分(図 11)は、なるべくシャワー粒子を通さない重い素材(タンタル)を用いて、バックグラウンドから検出器を守る必要がある。シンクロトロン放射が直線部に入り込まないようにするため、ビームが衝突点に入るほうのみビームパイプの内径が直径 20 mm から 9 mm まで絞り、非対称な形状となっている。径を絞っているのは入り口側だけなので、ほとんどの HOM エネルギー(付録 B)は下流側に逃げる事ができ、衝突点付近にトラップされるのはわずかである。また、二股部分の内壁にはギザギザの”ridge 構造”がつけられている(この”ridge 構造”については、次の章で説明する)。直線部分の端(チタン)とタンタルは HIP 接合³で行う。細いベリリウムの両端に重いタンタルがつくため、タンタルの重心近くを保持し、ベリリウム部分に力が加わらないようにする。

二股部分パイプの外側の検出器との隙間には、厚さ 1 cm 以上のタンゲステンの層を配置し、バックグラウンドが作るシャワーから内層の検出器を守る。

図 11 は SuperKEKB のビームパイプの衝突点付近を半割した様子である。

³HIP 接合とは、アルゴンガスなどのガスを媒体として高い圧力と高い温度の相乗効果を利用して処理する技術である。通常では溶接が困難である材料の接合も可能にする

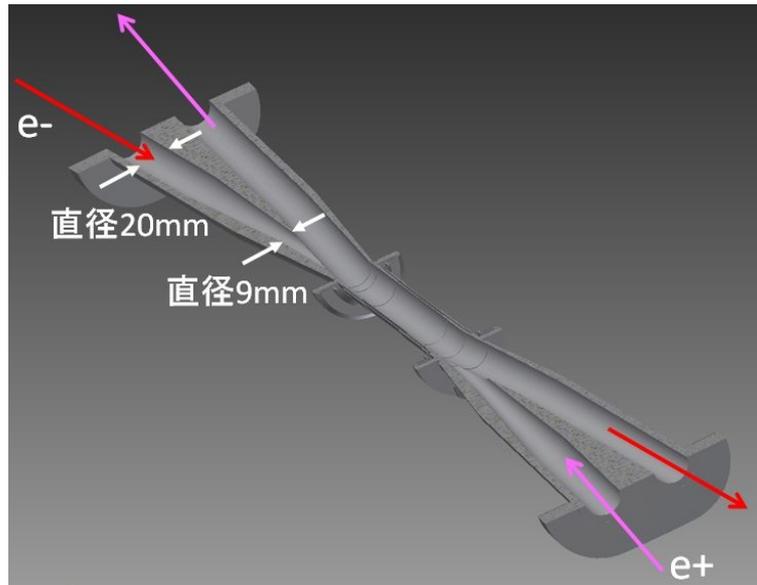


図 11: SuperKEKB のビームパイプ (2 股部分) を半割にした時の様子

3.2 検出器バックグラウンド

SuperKEKB では、ルミノシティの向上に伴い検出器バックグラウンドも大幅に増える。以下にバックグラウンドについて述べる。 [8]

1, タウチェック散乱

同一バンチ内のビーム粒子同士が散乱して運動量が増加または減少するものが対であられる。軌道を外れた粒子が衝突点付近でビームパイプに当たると、電磁シャワーおよび中性子を生成し、これらが検出器へ届くとバックグラウンドとなる。これをタウチェック散乱と呼ぶ。散乱の確率はビームサイズに反比例するため、ナノビームを採用する SuperKEKB ではタウチェック散乱によるバックグラウンドは急増する。ビームエネルギーの 3 乗に反比例するため、HER よりも LER による影響が大きい (LER のエネルギーが KEKB の 3.5GeV から 4GeV に変更されたことによりやや緩和されている)。対策としては、軌道を外れた粒子を上流の可動コリメータで可能な限り落とし、衝突点付近まで到達させないことが重要となる。KEKB では水平方向の可動コリメータは放射光の当たらないリング内側のみであったが、SuperKEKB では外側にも水平コリメータを置くことが必須である。水平コリメータは、水平ベータ関数または水平ディスパージョンが大きい場所に置くことで、軌道を外れた粒子を効率よく落とすことができる。コリメータをすり抜けて検出器内部でロスする粒子によって生成する電磁シャワーを止めるため、検出器アクセプタンスのすぐ外側に、減衰長の短いヘビーメタルで作ったシールドを置き、PXD や SVD を守る。ただし、検出器内部で生成する中性子はシールドが非常に難しく、各検出器の中性子耐性を注意深く見積もる必要がある。

2, ビームガス散乱

ビーム粒子が残留ガスに衝突すると、クーロン散乱により角度が変わり、制動放射によってエネルギーが減少する。軌道を外れた粒子が衝突点付近でビームパイプに当たってシャワーを生成し、検出器へ届くとバックグラウンドとなる（タウチェック散乱と同様）。これをビームガス散乱と呼ぶ。ビームガス散乱はビーム電流と真空度に比例するので、KEKB と同等の真空度を達成できればそれほど深刻ではないとされてきた。しかし、クーロン散乱により垂直方向に振動する粒子によるロス、ビーム電流と真空度以外に、衝突点直前のビームパイプの半径（KEKB より小さくなる）、衝突点直前の垂直ベータ関数（大きくなる）にも依存するため、対策なしでは前項のタウチェック散乱によるバックグラウンドと同等に危険であることが分かってきた。

原理的には、垂直可動コリメータを適切な位置に設置し、コリメータ部分での物理口径を衝突点直前よりも小さくすることで、衝突点直前でのビームロスを小さくできる。ただし、コリメータとビームとの距離を数 mm 程度まで近づけなければならず（水平コリメータは十数 mm）、ビームを不安定にする可能性（Transverse Mode Coupling Instability）が問題となった。加速器シミュレーションの結果、垂直ベータ関数が小さい場所に、適切な形状の垂直コリメータを置くことで、物理口径が小さくなることでわずかにビーム寿命を損なうものの、ビームを十分安定に保ったまま、衝突点付近でのビームロスを小さく抑えることができることが分かった。

3, シンクロトロン放射

ビームが磁場により曲げられる際に放射光を出す。衝突点付近の手前の最終収束電磁石で発生した放射光（数～数十 keV）がビームパイプのベリリウム部分を貫通して、内層の検出器（PXD/SVD）に当たるとバックグラウンドとなる。

また、衝突点を通り過ぎたビームが反対側の最終収束電磁石で曲げられる際に発生するシンクロトロン光が散乱されて衝突点側に戻ってくるとバックグラウンドとなる。KEKB では最終収束電磁石が両リングで共有だったため、反対側の最終収束電磁石の中心から離れたところをビームが通過して大きく曲げられ、強い放射光がでて問題であった。SuperKEKB では各リングが専用の最終収束電磁石を持っているので、KEKB の時よりこの寄与は少ない。

シンクロトロン放射については、次の 3.3 で詳しく述べる。

4, Radiative Bhabha 散乱

$e^+e^- \rightarrow e^+e^- \gamma$ の反応が衝突点でおきる。これを Radiative Bhabha 散乱と呼ぶ。Radiative Bhabha 散乱はルミノシティに比例して起こるので、SuperKEKB での散乱レートは KEKB の 40 倍になる。放出された γ がビームパイプ中を直進し、約 10m 下流の電極電磁石の鉄に当たって巨大双極子共鳴反応によって中性子を生成し、検出器付近まで戻ってきたものが KLM のバックグラウンドとなる。この過程による中性子生成レートは KEKB の 40 倍になるので、加速器トンネル内部に十分な中性子シールドを置く必要がある。また、 γ を放出してエネルギーを失った e^+ または e^- は軌道はずれ、ビームパイプに当たって電磁シャワーおよび中性子を生成する。SuperKEKB では、各リングが専用の最終収束電磁石を持つおかげで、ほとんどの粒子でビームパイプにあたってロスする位置は衝突点から十分離れた下流の場所となる。ごく一部（とはいえ、40 倍のルミノシティでは数 GHz に達する）の粒子は大きくエネルギーを失うか大きく散乱されて、検出器内部または検出器のすぐ外側でロスし、検出器バックグラウンドとなる。

5, 二光子過程

ルミノシティに比例して起こる。反応としては $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$ が挙げられる。ここで生成した電子・陽電子対 (e^+e^-) はエネルギーが低いいため、PXD にのみバックグラウンドとして寄与すると考えて行われたシミュレーションと KEKB でのマシンスタディから、問題ないレベルであることが確認されている。

7, ビーム・ビーム相互作用

ビームが相手のビームと衝突する際に、相手側のビームが受ける電磁場によって散乱されると、ビームバンチが non-Gaussian な tail を持つ。これはシンクロトロン放射などの見積もり (シミュレーション) に影響を与える。

3.3 シンクロトロン放射

3.3.1 原理

運動する電子が磁場中で軌道を曲げられると、運動の接線方向に電磁波を放出する。これをシンクロトロン放射と呼ぶ。電子の速度が光速と比較して、十分遅い場合、この放射光は \sin^2 に比例した強度分布を持つが、電子が光速に近づいた場合は、電子の周りの $\Delta\varphi \sim 1/\gamma$ という狭い角度内に分布する (ここで γ は電子のエネルギーと静止質量の比である)。 [17]

3.3.2 放射エネルギー

放射光とは、空間中の電荷分布の変動により、電磁波が変動し、それが空間中を波動として伝わっていく現象である。以下で放射エネルギーについて考える。

時刻 t'_0 に点電荷から放射された電磁波が時刻 t に観測点 x で測定されるとき単位時間、単位面積あたりのエネルギー量を Poynting ベクトル S を導入することで求める [10]。

$$S(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{E}(\mathbf{x}, t))^2 \mathbf{n}(t'_0) = \frac{1}{\mu_0 c} \left(\frac{e}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{\mathbf{n}(t'_0)}{c^2 \alpha^6(t'_0) R^2(t'_0)} \cdot [\mathbf{n}(t'_0) \times (\mathbf{n}(t'_0) - \dot{\boldsymbol{\beta}}(t'_0))]^2 \quad (2)$$

より

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{\mu_0 c^3} \left(\frac{e}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \int d\Omega \frac{[\mathbf{n}(t) \times (\mathbf{n}(t) - \boldsymbol{\beta}(t) \times \dot{\boldsymbol{\beta}}(t))]^2}{(1 - \mathbf{n}(t) \cdot \boldsymbol{\beta}(t))^5} \quad (3)$$

が得られる。点電荷から観測点 P に向けての単位ベクトル $\mathbf{n} = (\sin\theta\cos\phi, \sin\theta\sin\phi, \cos\theta)$ 、 $\boldsymbol{\beta} = (0, 0, \beta)$ 、 $\dot{\boldsymbol{\beta}} = (\alpha/c, 0, 0)$ とすると、放射光の角分布は

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (4)$$

より

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{(\alpha/c)^2}{\mu_0 c^3} \left(\frac{e}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{1}{(1 - \beta \cos\theta)^3} \cdot \left[1 - \frac{(1 - \beta^2) \sin^2\theta \cos^2\phi}{(1 - \beta \cos\theta)^2} \right] \quad (5)$$

となり、点電荷の進行方向に鋭いピークを持つことが分かる。角積分を実行すると

$$P = \frac{e^2 \alpha^2}{6\pi \epsilon_0 c^3} \frac{1}{(1 - \beta^2)^2} \quad (6)$$

となる。電流値 I でのエネルギー E の電子が電場 B で距離 l の偏光磁石中で放出する単位時間当たりの全放射光のエネルギーは

$$P = 1.27 E^2 B^2 l \quad (7)$$

とあらわすことができる。

3.3.3 KEKB でのシンクロトロン放射の影響

KEKB では、最終収束電磁石の手前の偏向電磁石や漏れ磁場など様々な場所で強力なシンクロトロン放射が発生していた。初期型のビームパイプには金メッキがなかったため、SVDの内層の読み出しチップが低エネルギーの X 線によるダメージを受けた。その後のビームパイプでは 10 μm 厚の金メッキを設けることで、このような問題は無くなった。また、数メートル下流の加速器のビームパイプの壁に放射光が当たり、後方散乱により Belle に入ってきていた。これは、放射光が最初に当たる場所のビームパイプの素材をアルミから銅に変え、形状もかえることで遠くに当たるようにした。さらに、ビームパイプの周りのアクセプタンス以外のところは、厚い金をはることで解決した。[12]

3.3.4 SuperKEKB でのシンクロトロン放射の影響

SuperKEKB では、上流の四重極電磁石 (QC1, QC2) をバンチが通過する際、バンチ中心以外の電子が磁場を感じて曲げられ、シンクロトロン放射が発生する。また、四重極電磁石からの漏れ磁場が、反対側のビーム軌道に無視できない影響をあたえることによっても、シンクロトロン放射が発生する。KEKB では下流の QCS を通過する際にも磁石の中心から外れた場所を通るため、軌道が大きく曲げられて強いシンクロトロン放射が発生させていたが、SuperKEKB では上流下流それぞれが独立の最終収束電磁石を持つ構造をしているので、下流からのシンクロトロン放射の寄与は小さい。また、シンクロトロン放射のエネルギーは式 7 より、 $E^2 B^2$ に比例するので、SuperKEKB では HER を KEKB 時の 8 GeV から 7 GeV にすることでシンクロトロン放射のエネルギーも緩和される。一方で、SuperKEKB ではビーム電流が 2 倍に増える。また最終収束電磁石の置く位置を衝突点に近い場所に設定したため、衝突点にもっとも近い検出器である PXD にとってシンクロトロン放射は注意すべきである。

図 12 は上流の四極電磁石で発生するシンクロトロン放射の様子を GEANT4 を用いてシミュレーションをした結果である。図 12 の左図より、一部のシンクロトロン放射が、ビームパイプの直線部分でビームパイプの内側にあたっていることが分かった。図 12 の右図は、シンクロトロン放射のエネルギー分布を示したもので、主に 20 keV 以下であることが分かる。

次に、シンクロトロン放射がビームパイプ内壁に当たった際、ビームパイプを透過して PXD 検出器にどれくらい達するかの割合を GEANT4 を用いて調べた。図 13 のようなビームパイプに模したジオメトリを用意し、入射角度が 41.5 mrad で 1 keV、5 keV、10 keV、20 keV の photon を入射させた時、ビームパイプによるシンクロトロン放射光をどの程度防ぐことができるかを、図 13 の金メッキの厚さが 10 μm で photon を入射させたとき、及び金メッキの厚さが 5 μm で photon

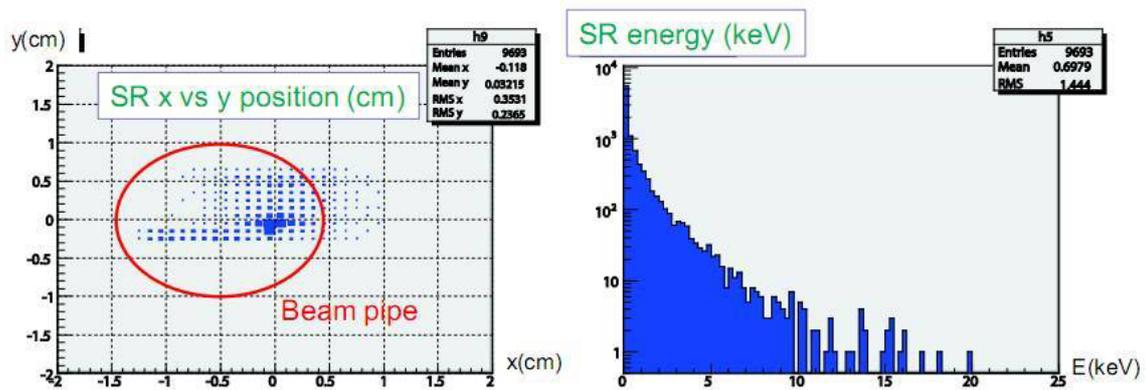


図 12: 上流の四極電磁石で発生するシンクロトロン放射の様子を GEANT4 を用いてシミュレーションした結果、左図の赤丸はビームパイプの領域を示している。右図は、横軸が発生したシンクロトロン放射のエネルギー、縦軸は photon 数である。

を入射させたとき、そして金メッキの厚さが $10 \mu\text{m}$ で photon を角度 90 度で入射させた時の 3 つの場合で photon が遮蔽される確率 (阻止率) を比較したものが表 2 である。表 2 より、ほとんどのシンクロトロン放射は、ビームパイプで止められることが分かる。しかし、放射光が散乱した後、大きな角度 (90 度) をもってビームパイプに当たると、特に高いエネルギーの放射光で危険であるということも分かった。これは金との反応が大きな角度ほど小さいからである

最後に、図 14 は photon が Si(PXD) と Au($10 \mu\text{m}$) に photon が入ったときの阻止率を photon

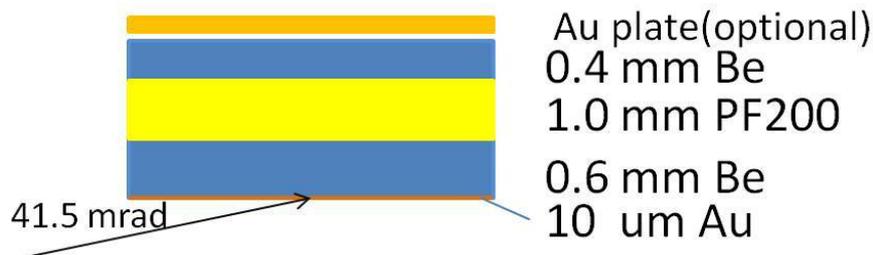


図 13: ビームパイプ内側から Au を通り抜け出てくる photon のシミュレーションのためのセットアップ

のエネルギーの関数として示したグラフである。例えば、 12 keV の photon が 10^5 個入ったとする。photon が何個 PXD で反応するかは、このグラフから、 $10^5(\text{photons}) \times 0.03(\text{Au の透過率}) \times (1 - 0.72(\text{Si の透過率})) = 560$ 個の photon が反応する。また、 5 keV 以下の Au の透過率は、 10^{-6} 以下であるので、ほとんどのシンクロトロン光からくる photon が PXD で止めることができる。このグラフから 5 keV 以上の photon が問題となることが分かる。したがって、問題となるエネルギーは図 12 と図 14 から $5 - 20 \text{ keV}$ のエネルギーの X 線である。

Energy	図 13 の時	10 μm の Au が 5 μm になった時金メッキ	90 °で入射させたとき
1 keV	100	96.3	99.7
5 keV	100	97.8	99.6
10 keV	100	96.4	96.3
20 keV	100	97.8	80.2

表 2: ビームパイプによる放射光の阻止率

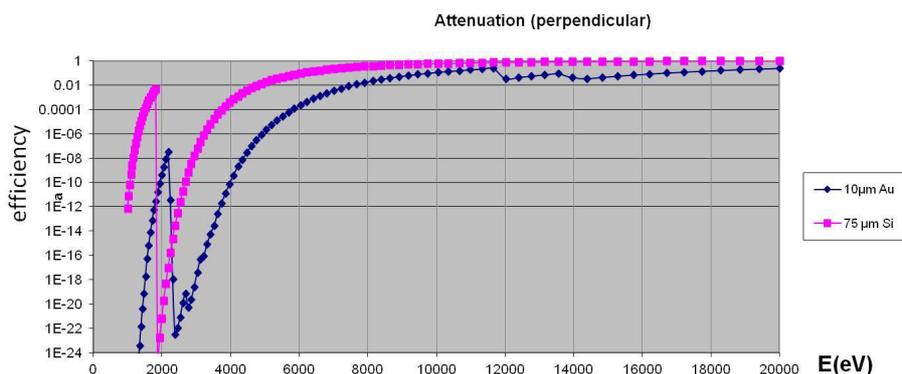


図 14: photon がピクセル検出器または金に入った時の透過率とエネルギーの関係

3.3.5 SuperKEKB でのシンクロトロン放射への対策

シンクロトロン放射光が PXD に到達するのを防ぐため (PXD の要求はヒットしている割合の 2% 以下である。)、以下のような対策が取られている [13]。図 15 はビーム衝突点付近のビームパイプのデザインを表し、斜線部はシンクロトロン放射の範囲をしめしている。図 16 は、コリメーターを置いたときのシミュレーション結果を表している。また、図 18 は、ridge 構造をアルミで作成したモックアップに左側から赤色レーザー光を ridge 部分に当てている様子である。

1、入射側のコリメーション

シンクロトロン放射が直線部分 (ベリリウムで作られたビームパイプ部) に入り込まないようにするために、衝突点近傍のビームパイプの内径の入り口部分を KEKB 時は直径 20 mm に対し、今回 9 mm まで絞る (図 15)。径を絞っているのは入り口部分だけであるので、ほとんどの HOM エネルギー (付録 B) は下流に逃げる事ができ、衝突点付近にトラップされるのはわずかである。入射側のビームパイプは直径 9 mm までテーパ状に絞られており、これによってビーム軌道に平行なシンクロトロン光がビームパイプ直線部に直接当たることを防いでいる (図 15 参照)。一方、出口側のビームパイプ側は直線部と同じ 20 mm である。

2、ridge 構造

前項のコリメーションにより、シンクロトロン光がダイレクトにビーム直線部に当たることを防ぐことができるが、コリメーション部分に当たったシンクロトロン光が、反射または散乱されてビームパイプの直線部分に当たる可能性が残っている。

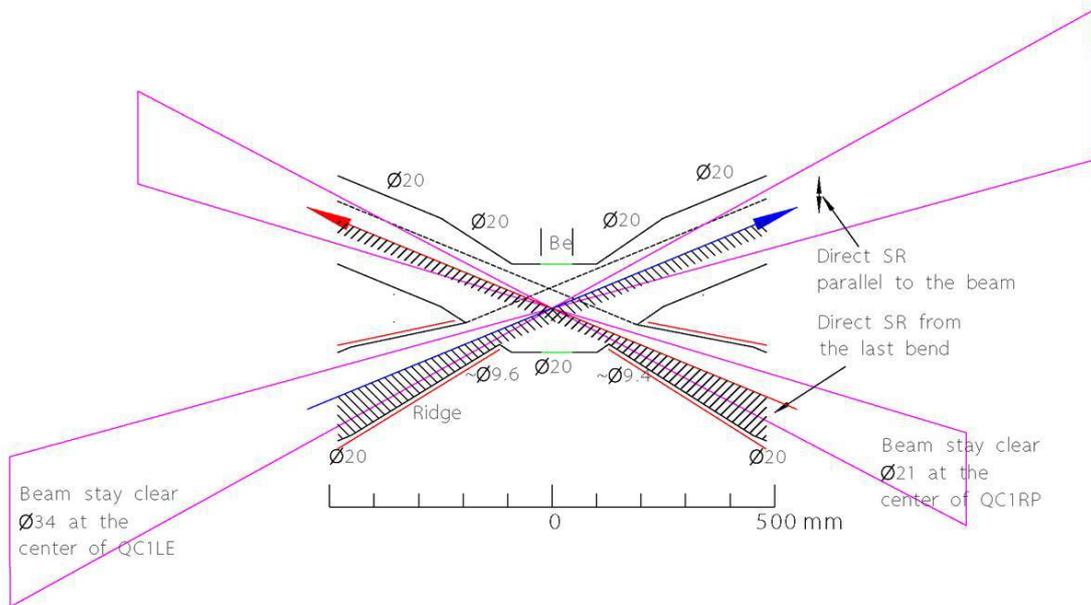


図 15: 衝突点付近のデザイン

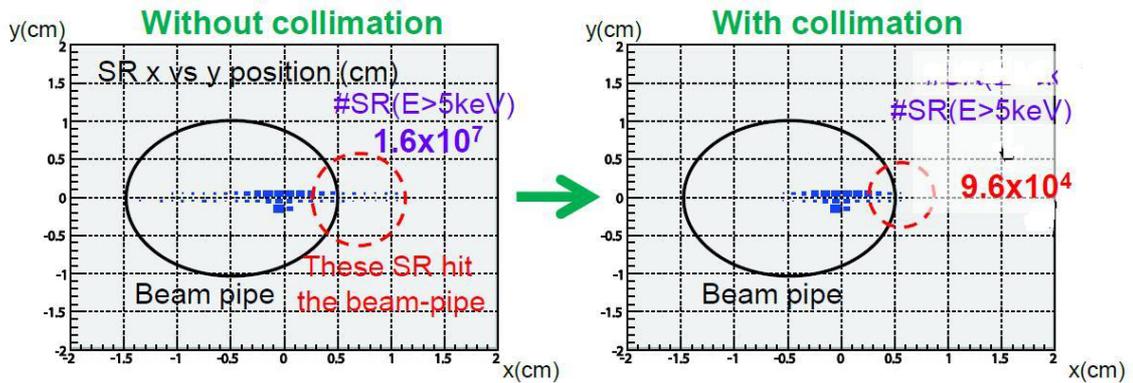


図 16: コリメーターを置いたときのシミュレーション結果。黒丸はビームパイプの径を表しており、ビームパイプからはみ出た photon に注目している

その影響を改善するために考えられたのが”ridge 構造”である。図 17 のような鋸歯状のギザギザ (図 17 の黄色の部分) をビームパイプのコリメーション部分に作ることでギザギザの山の斜面 (上流側) に当たって、反射または散乱したシンクロトロン光がビームパイプの直線部分に当たることを防いでいる。ただし、山の頂点に当たって tip-scattering する放射光に関しては完全に防ぐことができるかわかっていない。図 17 は、Be パイプにシンクロトロン光が入射しないような”ridge 構造”の設計となっている。

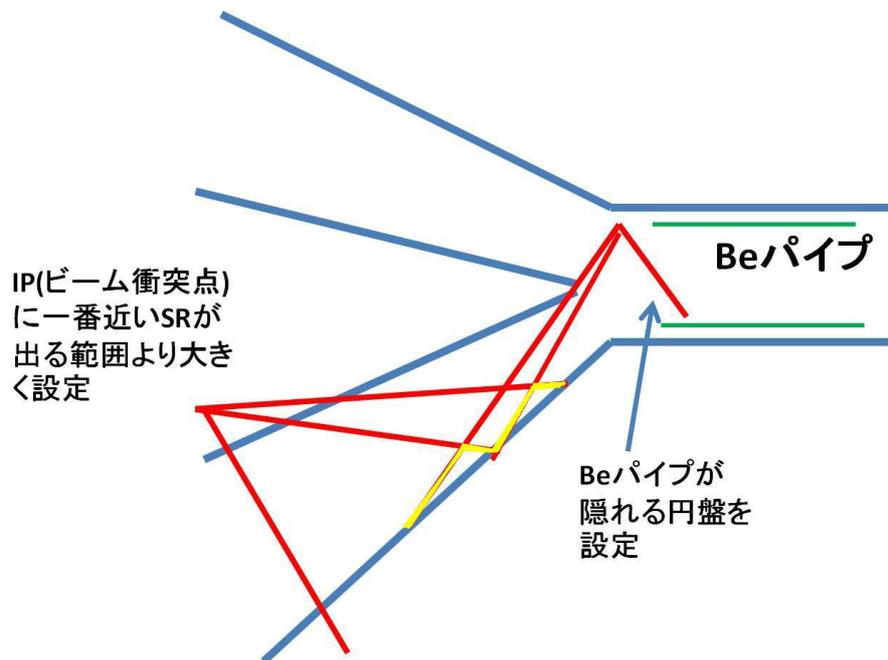


図 17: ridge 構造の成り立ち. 上の図のようにまず 1 つ ridge をつくり、そのあと、2 つ目を作っていく、シンクトロン光がベリリウムパイプに入射しないように作られている。

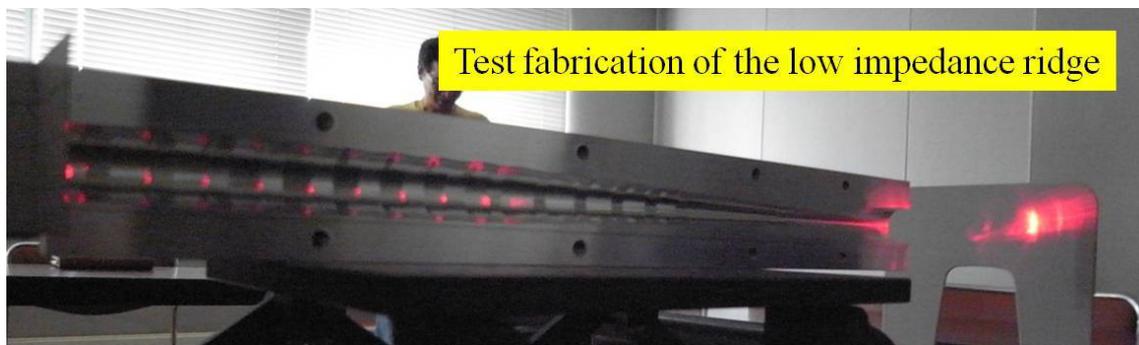


図 18: アルミによる ridge 構造のモックアップ (左側から赤色レーザー光を ridge 部分に当てている)

3.3.6 シミュレーションの現状

ビームパイプで X 線が完全に吸収されるという簡易シミュレーションがすでに行われ、PXD に到達する放射光は 1 バンチ当たり約 10^{-4} photon であり、PXD の十分に要求を満たしていることが分かっている。しかし、これは据え付け精度がよいときの話であり、ridge 構造を入れたシミュレーションはまだ行われていない。

今後、ビームパイプ表面での散乱や反射を考慮し、さらに ridge 構造のギザギザの頂点での散乱 (tip-scattering) を考慮したより詳細なシミュレーションを予定している。しかし、tip-scattering は、シミュレーションで再現することは難しいため、実験を行い、シミュレーションで使うパラメーターをきめることが求められている。3.3.5 でも引用した GEANT4 を用いたシミュレーショ

ンにおいて、PXD の要求はみたしていることが分かっている。このシミュレーションは反射や散乱を考慮しない簡易的なものであり、より詳細なシミュレーションが必要である。一般的に物質表面での X 線の反射は表面の粗さなどに依存し、シミュレーションにおけるモデリングが難しい。特に今回は ridge 構造の山の頂点に放射光が当たった際の tip-scattering を考える必要があり、より問題を難しくしている。このためビームパイプの実物に近い試験片に対して X 線照射実験を行い、散乱光の角度分布を測定する必要がある。

4 シンクロトロン放射光の反射率測定

4.1 シンクロトロン放射光テストの目的

BelleII では、最終収束電磁石を衝突点の近くに置き、ビーム電流も KEKB 時より大きくするため衝突点近くに設置する検出器である PXD にとって、シンクロトロン放射は無視できない存在である。このバックグラウンド対策として、ビームパイプの衝突点付近では 2 股部分に "ridge 構造" を用いることも考えられている。この構造のぎざぎざの頂点に当たった時に、どのようなふるまいを放射光が行うかは、シミュレーションでは難しい。今回の実験では、実際に波の頂点に、シンクロトロン放射が PXD に入ったときに問題となるエネルギー領域の X 線を当て、どのようなふるまいをするかを測定することが目的である。

10 keV 程の X 線領域では、入射角度が 0.5 度以下の時、表面の粗さが少なければ全反射があるとされている [14]。この全反射の性質が今回のタンタル片であれば、ridge 構造があっても、当たり所によってはバックグラウンドを増大させてしまう危険性がある。この全反射があるかをタンタル試験片の "ridge 構造" にあたらぬ平面に X 線を照射し測定することも目的としている。

4.2 セットアップ

本実験では、ビームパイプ内側の "ridge 構造" を模したタンタル試験片をターゲットとして 5-20 keV 程度の X 線を照射し、試験片の表面で反射または散乱された X 線がどのような角度分布を持つか測定する。この測定をするためのセットアップについて以下でそれぞれ説明する。

4.2.1 X 線源

X 線発生装置で 2 回、KEK にある放射光施設 PhotonFactory(PF) で 2 回行った。X 線発生装置と PF の概要を以下に簡単に示す。

1、X 線発生装置

X 線発生装置は図 19 に示す KEK に設置されているものを使用した。X 線管は、熱電子 2 極管の構造を持つ高真空の真空管の一種であり、W. D. Coolidge が実用化したことからクーリッジ管とも呼ばれている。高温に熱したフィラメントから熱電子を発生させ、10 ~ 300keV の高電圧で加速して、金属ターゲット (陽極) に衝突させると X 線が発生する。発生した X 線のエネルギースペクトルは、電子の加速エネルギーを最大エネルギーとする制動放射による連続スペクトルと、ターゲット金属の原子構造によってエネルギーが決まる線スペクトル (特性エックス線とも呼ばれる) の混在したものとなる [14]。今回は、線スペクトルを利用したいため、X 線入射口に Ag をはることで低エネルギーの X 線を止めた。以下に仕様を記述する。

- ターゲット Mo(モリブデン)
- エネルギー比 ; $K_{\alpha 1}:K_{\alpha 2}:K_{\beta}=17.49\text{keV}:17.39\text{keV}:19.62\text{keV}$

- 強度比 ; $K_{\alpha 1}:K_{\alpha 2}:K_{\beta}=100:50:20-30$
- 最大出力 ; 2.4kW
- Be 窓厚 ; 0.3mm

今回用いた X 線発生装置は X 線の照射方向に対して 5.5 度傾いたものを使用した。また X 線は円錐状の広がりを持っており、発生位置から距離の 2 乗に反比例して X 線強度は下がっていく。つまり、X 線は検出器が遠くにあればある程広がりをもち発散している。



図 19: X 線発生装置

2、Photon Factory(PF)

KEK の PF における実験では BL14-C のビームラインを使用した。PhotonFactory では、大型の加速器で発生させた電子を、磁場で曲げることにより発生する放射光 (X 線) を使用する。この実験ステーションでは、縦型ウイグラーから発生する白色 X 線または、モノクロメータからの単色 X 線を利用できる。今回は結晶 (Si) に当てることにより白色から単色を取り出している。X 線のエネルギーはミラーの角度で変化させる [15]。以下に仕様を書く。

- 光学系 ; 2 結晶分光器
- エネルギー領域 ; Si(111):7-40 keV
Si(220):12-66keV
- 分解能 ; 60 eV/33 keV(Si(111))
- ビームサイズ白色 X 線 ; 縦 38 mm × 横 8 mm
単色 X 線:縦 38 mm × 横 8 mm
- ビーム強度 ; 約 10^8 photons/mm²/s (33 keV)
- ビーム方向 ; 上方向に約 4.4mrad の勾配を持つ。

X 線発生装置と違い、発散の少ない光源であるため、回折計を用いることで平行ビーム光学系を採用しており、X 線の位置に対して試料や検出器等の光学系の配置の自由度が大きい。したがって波長の単色性が優れていることに加え、ガウス分布関数に近い、対称性のよい、半値幅の小さな X 線のプロファイルを得ることができる。また、任意の波長の X 線を使用することができる。

4.2.2 X 線照射ターゲット

図 20 は実験で用いるタンタル試験片の設計図である。これをもとに作ったタンタル片は図 21 であり、左の写真は上から、右は斜め上から撮った写真で同じタンタル試験片を写している。

厚さ 3 mm、30 mm 四方のタンタル板の片面に、高さ 1mm の Ridge 構造を施した出っ張りを作ってある。放射光を当てる面には、100 μ m の金メッキが施してある。

4.2.3 X 線検出器

PXD で問題となるシンクロトロン放射からくるバックグラウンドの X 線のエネルギーは 5-20 keV である。この波長領域を感度よくとらえることができる検出器としては、半導体検出器がある。半導体検出器は、PC とつなぐとすぐ使えるものまで販売されているが、高価である。よって、本研究では、半導体検出素子である雑音の少ない PIN フォトダイオードに高い増倍率を兼ね備え、読み出し速度の速いアバランシェダイオード (APD) を X 線検出器として製作し検討した。半導体検出器や APD の詳細については付録 D で述べる。

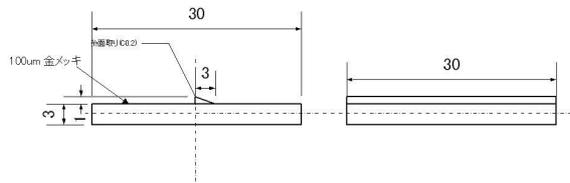


図 20: 実験で使うタンタルの設計図



図 21: 実験で使うタンタル片。厚さ 3 mm、30 mm 四方のタンタル板の片面に、高さ 1mm の”ridge 構造”を施した出っ張りが作ってある。放射光を当てる面には、100 μm の金メッキが施してある。

4.2.3.1 本実験で使う APD の検討

今回のシンクロトロン放射光テストは、5-20 keV 程度の X 線を対象としている。したがって、その波長領域で感度がよい光検出器を選定するため、リバー型 APD とリーチスルー型 APD を比較した。

リバー型は浜松ホトニクス製の S8664-55 (5 mm 角)、リーチスルー型は浜松ホトニクス製の S10936(X) (5 mm 角) を使用した。

1, セットアップ

リバー型の APD とリーチスルー型 APD の周辺回路のセットアップは図 22 とする。ここで、リバー型 APD へはバイアス電圧 -350 V とした。リーチスルー型 APD ではバイアス電圧 -400 V とした。このとき、リバー型 APD のゲインは 30 である。リーチスルー型 APD のゲインは 40 である。

ASD アンプは、ATLAS 測定器の検出器のひとつに取り付けられるアンプとして採用されている。ASD アンプの増幅率は 0.8 V/pC である。信号の立ち上がりは 16 nsec と一定であり、入った電荷量に比例した波高を出力する。また、ASD Buffer には 10 倍のゲインがある。ここでは、Na の線源 (511 keV) を使用した。

2, 結果

図 23 はリバー型 APD に Na (511 keV) を当てた時の出力波形である。同じく、図 24 はリーチスルー型 APD に Na を当てた時の出力波形である。波形はリバー型 APD は、約 300 mV である。一方、リーチスルー型 APD は、約 800 mV で

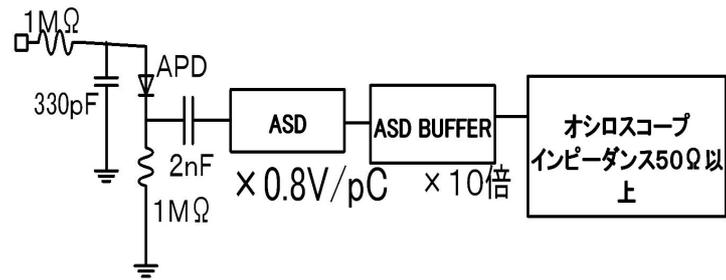


図 22: APD 周辺回路図

ある。

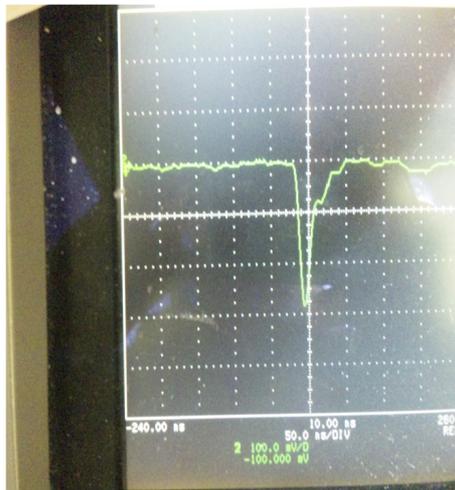


図 23: リバース型 APD に Na(511 keV) を当てた時のオシロスコープでの出力

4. 考察

リーチスルー型のほうが、出力は大きい。また、リバース型が雑音レベルが -20 mV に対し、リーチスルー型は -10 mV 程である。ここから、リバース型 APD の雑音レベルは対象エネルギーが低くなったときに信号と雑音を区別できない恐れがあるので、リーチスルー型 APD を使用することを決定した。

4.2.4 自動ステージ

実際にタンタルに X 線を照射し散乱分布をみるために、今回 PhotonFactory (PF) と X 線発生装置を使って 2 回ずつ実験を行った。ただ、PF で実験を行える時間は短く、いかに効率よく正確に準備を行うかが求められる。そのため、実験で使うステージは自動ステージを用いた。

実験手順としては、持ち運びのできるようにしたタンタルとステージ、X 線検出器 (APD) を一体にしたもの (図 25) を目分量でビームがタンタルにあたりそうな所に置く。そのうえで、ビー



図 24: リーチスルー型 APD に Na(522 keV) を当てた時のオシロスコープでの出力

μと X 線検出器である APD の高さをレーザーで合わせる。そして各座標のアライメントをとる。各座標の定義について次に示す。

4.2.4.1 座標軸の定義

図 25 は実際のセットアップの写真である。また、図 26 は図 25 を絵としてかいたものである。座標軸は以下のように定義した。

1. タンタルに当たった後の散乱を広範囲で APD で見るための θ 軸
2. X 線をタンタルに正確に当てるために調節したり、タンタル片接地面の位置調節のための Y 軸
3. X 線のビームとタンタル接地面を平行にするための α 軸

以下でそれぞれの座標軸について説明する。また、図 26 において、

1. θ は、X 線上流からみて右側をプラス方向
2. Y は、X 線上流から見て左側をプラス方向
3. α は、X 線上流から見て、右回りをプラス方向

と設定した。

1、 θ 軸

ステージには、シグマ光機製の SGSP-60YAW-0B の自動ステージを使用した (図 27)。これは、ステッピングモータ駆動の回転ステージである。ガイドにはベアリングが採用されており、送り機構にはウォームギアが使用されている。オーバーハング荷重によるモーメント荷重や複合荷重にあまり強くない設計構造になっているタイプのものである。自動ステージは、PC でパルスを送ることにより動く。 ϕ であらわされる角度は、PC から 36000 count 送ると 90 度回転する。つまり 1 パルスで 90 度/36000 count=0.0025 度移動するため APD センサーサイズによる位置精度 (誤差 =0.98 度) にくらべ十分小さいのでバックラッシュの影響はほぼないと言える。

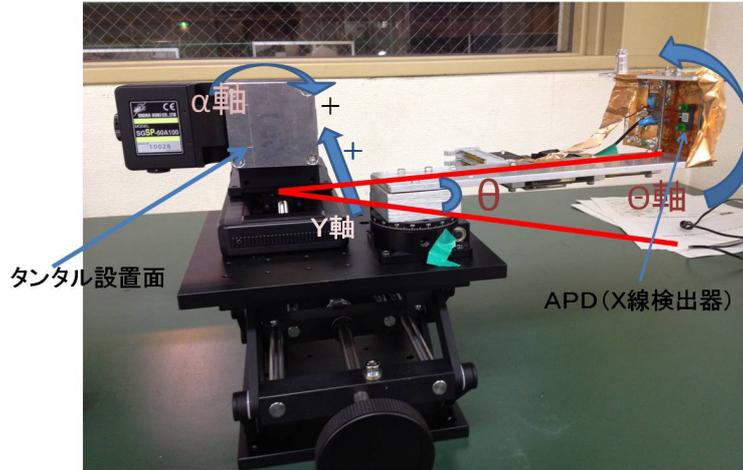


図 25: 座標軸の説明のためのセットアップ図

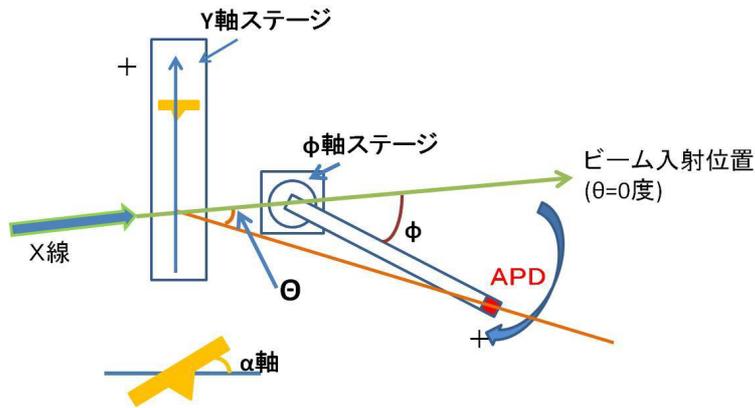


図 26: 座標軸の説明のための概念図、ここではステージを上から見ている

図 28 と図 29 は、 θ 軸（正しくは ϕ 軸を動かしそれを θ に変換している）を動かした時に、タンタル片が X 線に当たっていない時（図 28）とタンタル片が X 線に当たっている時（図 29）を表した図である。また、図 30 は図 28 の時の予想される APD のカウントレートの様子であり、同様に、図 31 は図 29 の時の予想される APD のカウントレートの様子である。このように、タンタルに X 線を照射し、 θ の角度を得ることで、X 線の散乱（X 線の様子）を APD で広範囲にわたり見るとため θ 軸を設けた。

この θ 軸というものは、実際に動いている軸は、図 25、図 26 をみてわかるように ϕ 軸（図 27）が動いており、それをタンタル片と X 線が交わる点における X 線の 0 点（図 32）の方向と APD の反応のあった方向の間の角度 θ に実験のデータでは変換している（図 26）。以下に変換の式 8 を示す。

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{290(\text{自動回転ステージの中心から APD までの距離})\cos\phi}{\sqrt{150^2(\text{試験片から自動回転ステージの中心までの距離}) + 290^2 + 2 \cdot 150 \cdot 290\cos\phi}} \right) \quad (8)$$



図 27: θ 軸のための自動ステージである ϕ 軸ステージ



図 28: タンタル片がX線に当たっていない時の θ 角を動かした様子
 図 29: タンタル片がX線に当たり始めた時の θ 角を動かした様子

この ϕ を動かすことにより、軸を動かし、一番 APD のカウントレートが大きいところを θ が 0 度の場所とした図である (図 32)。この場所を 0 点と呼ぶ。

2、Y 軸

Y 軸は、シグマ光機製の SGSP26-50 を使用した (図 33)。精密な直動案内のガイドと精密ボールねじの機能を一体化した構造でかつ直動案内のガイド、インナブロック (テーブル) 駆動ボールねじとが同位置にある。オーバーハング荷重によるモーメント荷重や複合荷重に強い設計構造になっているタイプのものでピッチロールの影響を受けにくい。

また、 θ 軸と同様、PC でパルスを送ることにより動き、PC から 24000 count 送ると 5 cm 動く。つまり、1 パルスで $5 \text{ cm} / 24000 \text{ count} = 2.0 \mu\text{m}$ 移動するため APD センサーサイズによる位置精度 (5 mm) にくらべ十分小さいのでバックラッシュの影響はほぼないと言える。

図 34 と図 35 と図 36 は、 θ 軸についている APD を図 32 の場所に固定し、Y 軸を動かすことで、タンタル片にあたり X 線が減る様子を示したものである。この様子から、X 線がタンタル片に当たり始めると APD のカウントレートが 0 度の位置では減っていくことが予想される。図 37 は図 34 と図 35 と図 36 の場所で予想される APD のカウントレートの移り変わりを表した図である。Y 軸を動かすことで、タンタルに X 線が当たり始める位置が予想できる。図 37 の 2 番のところから当たり始めることが分かる。ここから、Y 軸の範囲を決め、その時々 θ の分布を見ることがで

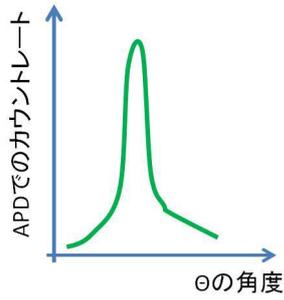


図 30: 図 28 で予想されるグラフの形

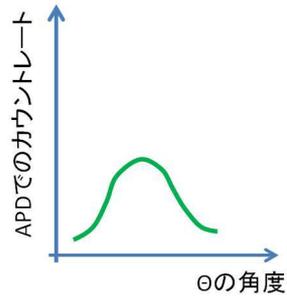


図 31: 図 29 で予想されるグラフの形

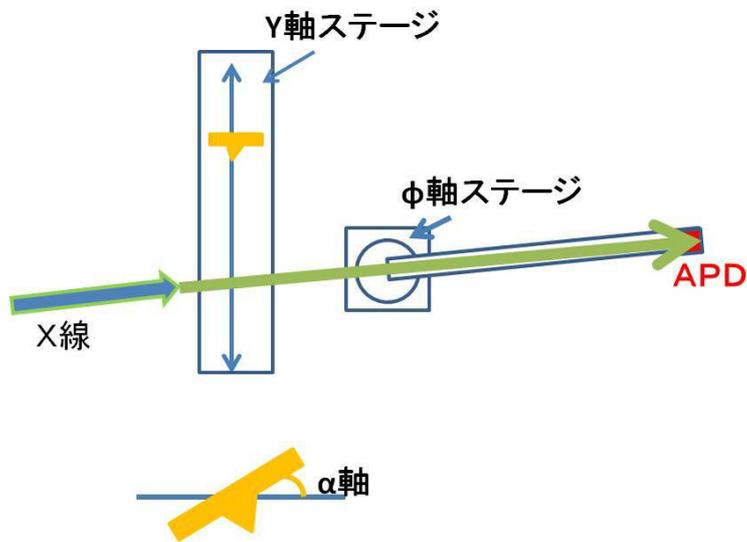


図 32: X線 beam が何にも干渉されず、まっすぐ来た時の $\theta=0$ 度の場所を表したもの

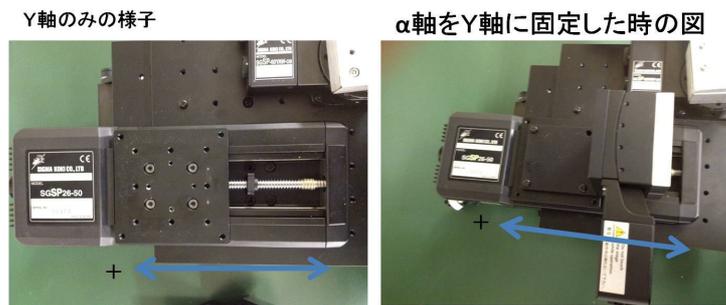


図 33: Y軸のステージ。左図はY軸のみの自動ステージの写真である。右図はY軸に α 軸を固定した写真である。

きる。

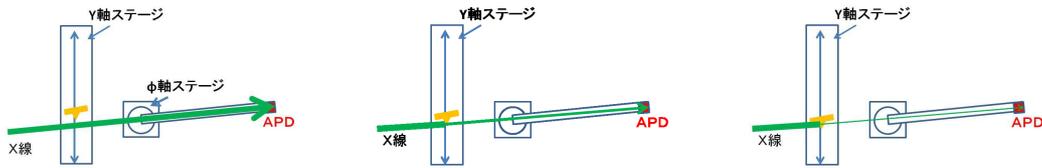


図 34: タンタル片がX線に当たっ 図 35: タンタル片がX線に当た 図 36: タンタル片がX線に完全
ていないの様子 (1) り始めた様子 (2) にあたっている様子 (3)

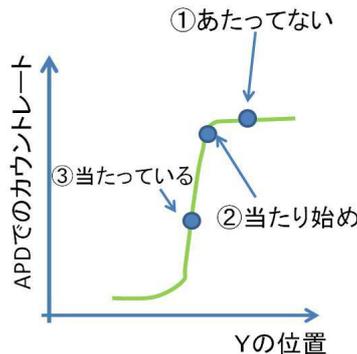


図 37: 図 34=1、図 35=2、図 36=3 で予想されるグラフの形

3、 α 軸

α 軸は当初 (X線発生装置の第2回目まで) は図 38 を使用していた。これは、Y軸にL型ブラケットをつけ、スペーサーをいれ、X軸小型ラックピニオンステージ (TAR-25801) を取り付け、そのテーブル部分に α 軸となる α 軸ゴニオステージ (GOH-25B30) を取り付けたものである。(全てシグマ光機製)

しかし、正確な α を値として出せず、目分量でしかできなかった。また、手動だと時間がよりかかってしまいPFでの実験で手間取ると考えたため α 軸用の自動ステージを使うことにした。取り付け方法はY軸にL型ブラケットをつけ、小型自動ステージ (SGSP-60A75) を取り付けた (図 39) (全てシグマ光機製)。このステージは移動ガイドにクロスローラを採用した、ステップモータで動いている。また、 θ 軸、Y軸同様にこのステージはPCからパルスを送ることで動き、6280パルスで10度動く。つまり1パルス0.001度動き、とても小さいのでバックラッシュによる心配はない。

図 40 と図 41 と図 42 は、タンタル試験片を α 面に設置していない状態で、 θ 軸上にあるAPDを図 32の場所に固定し、Y軸を動かすことで、タンタル片にあたることでX線が減る様子をそれぞれの α 角を変えて比較したものである。この図 40 と図 41 と図 42の時のそれぞれの予想されるAPDのカウントレートの様子をグラフにしたものが図 43 と図 44 と図 45 である。

このグラフに関して、APDでのカウントレートが下がり始める立下りの点とAPDでのカウントレートが0に近くなる立ち上がりの点とをとり、その平均をとる。そして、 α の角度を変え、同じことをくりかえす。それぞれの α での立下りと立ち上がりの平均を比べる。一番低い平均をもつ α 角がX線ビームとタンタル設置面が平行になった点である。なぜなら、X線ビームとタンタル設置面が平行になった点というのは、一番X線がタンタル設置面に当たるのが遅いからである。このよ

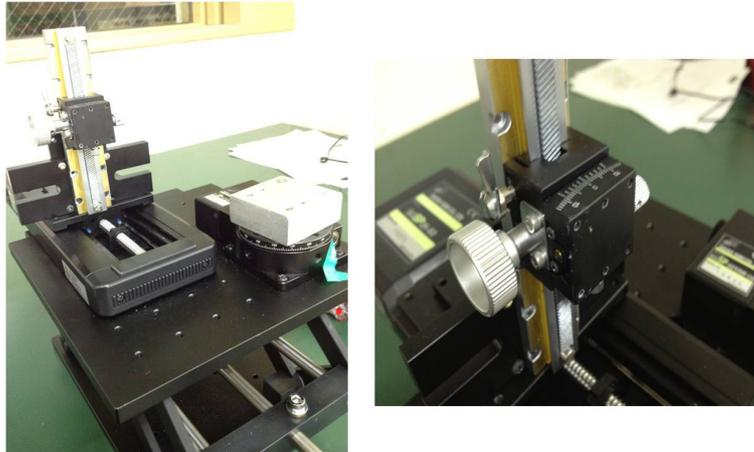


図 38: α 軸調整用の手動ステージ

α 軸のみの様子



α 軸をY軸に固定した時の図



図 39: α 軸調整用の自動ステージ

うに、 α 軸は X 線とタンタル接地面を平行にするために設けた。

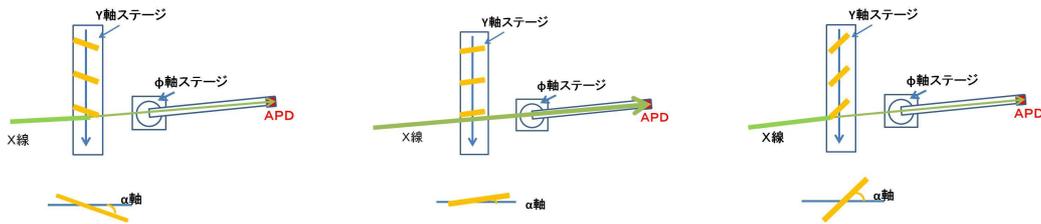


図 40: α 軸マイナスの時の様子 図 41: α 軸がX線と平行の様子 図 42: α 軸プラスの時の様子

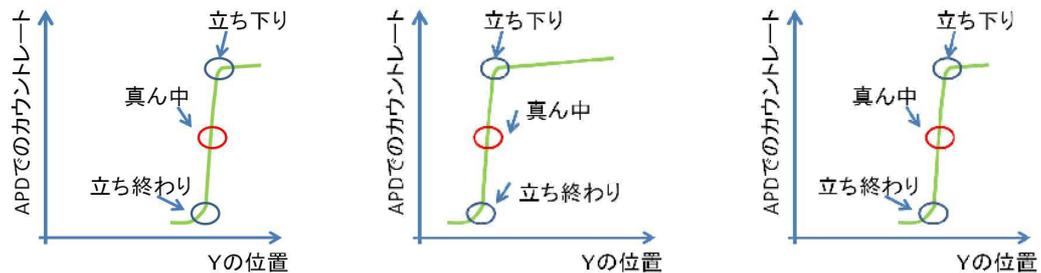


図 43: 図 40 時の予想されるグラフ 図 44: 図 41 時の予想されるグラフ 図 45: 図 45 時の予想されるグラフ

5 実験 1: X 線発生装置でのテスト

5.1 目的

ビームテストの手順を決定し、放射光でのビームテストの動きを把握することで、時間の限られる PF でのビームテストに備える。X 線発生装置では、広がったビームになってしまうが、X 線を tip 部に当てた時の様子も測定する。

5.2 第一回目 X 線発生装置でのテスト

実験は 2011 年 8 月 2 日から 12 日に行った。この実験では、PF でのビームテストでの手順の検討を行うことを目的とした。図 46 は X 線発生装置のセットアップの様子である。検出器である APD と X 線の通る高さはレーザーで合わせた。そのうえで実験を進めた。

5.2.1 X 線発生装置が使えるかの検討及び APD の動作確認

1. APD に X 線を照射した時の動作確認

図 47 は、リーチスルー型に鉄線源 (5.9 keV) を置き、APD に HV = -500 V かけた時の様子である。

15 mV から 18 mV 程の信号が出力されている。ここから、X 線発生装置では、17.5 keV の X 線が発生していることを考えると、図 47 の出力である 15-18 mV からエネルギー比で計算すると

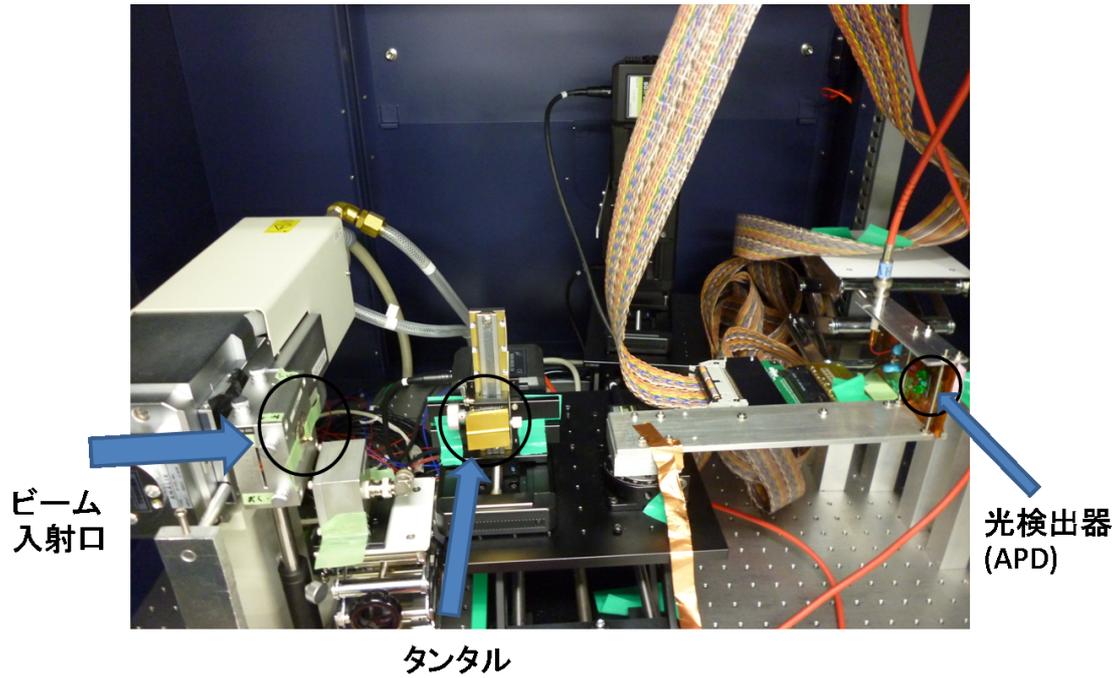


図 46: X線発生装置でのセットアップの様子

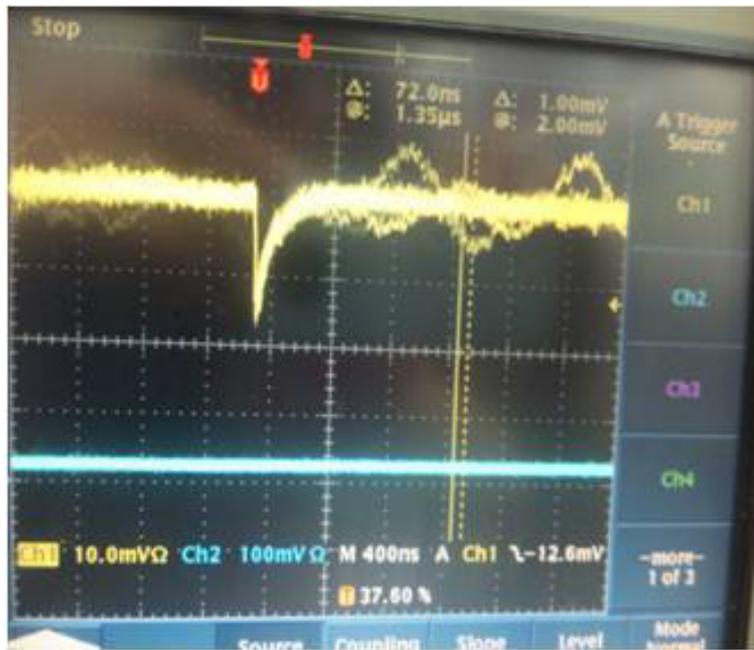


図 47: 鉄線源 (5.9keV) を置いたときのオシロスコープの様子

期待されるパルス波高は 45-53 mV である。

図 48 はリーチスルー型 APD に X 線発生装置からの X 線 (17 keV) をあて、APD に HV = -500

V かけた時の様子である。図 48 から、パルス波高が 50-60mV 出ており、鉄線源の図 47 から考え、

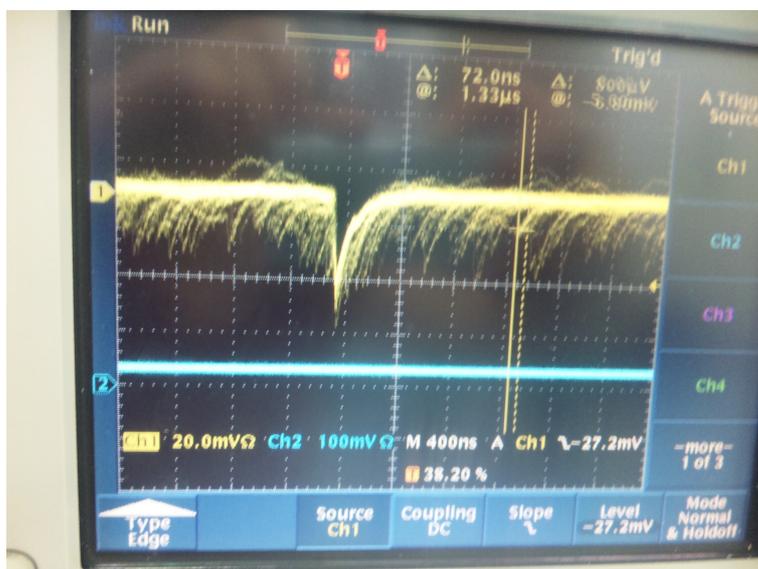


図 48: X線発生装置 (17keV) のX線を見たとき

妥当なパルスが出ていると考えた。

2. カウント数の検討

X線発生装置から出ているX線がAPDでとらえられているかをみた。

このとき使用したphoton数の理論値は、電圧:25 kV、電流:2 mA、ビーム発生位置から100 mmのとき、 1.6×10^9 photon/cm²/secである。

実際には、ビームサイズは2mm²、発生装置から400 mm離れたところにAPDを置いているので 2.0×10^6 photon/secである。

今回、リーチスルー型APDにおいて、HV=-500 V, threshold=-50 mVとした時、カウントレートは、159003 (Hz)である。予想値は、約 10^6 Hz、実測値は、約 10^5 Hzであり、予想されているものの1/10となった。これは、検出器のアクセプタンスやビーム強度の不安定性、APDの高さ調整の不十分さなどを考慮すると誤差の範囲であると考えた。また、本実験でほしいphoton数を十分に確保できることがわかったため、この状態で実験を続けることにした。

この結果から、リーチスルー型のAPDがX線検出器として使えることがわかった。また、X線発生装置で十分なphoton数を得ることができるとわかった。次に、APDをX線検出器として、タンタル片へのX線反射率測定を正確に行うためのアライメントの決定を行う。

5.2.2 アライメント

1. ビームの位置調べ

θ 角を回転させ、X線が一番照射される場所を決定する。これは4.2.4.1の図32の時の状態の場所を探すために行った。

図 49 からビームのピークの位置が-2.32 度付近にあることが分かる。ここから、-2.32 度をビー

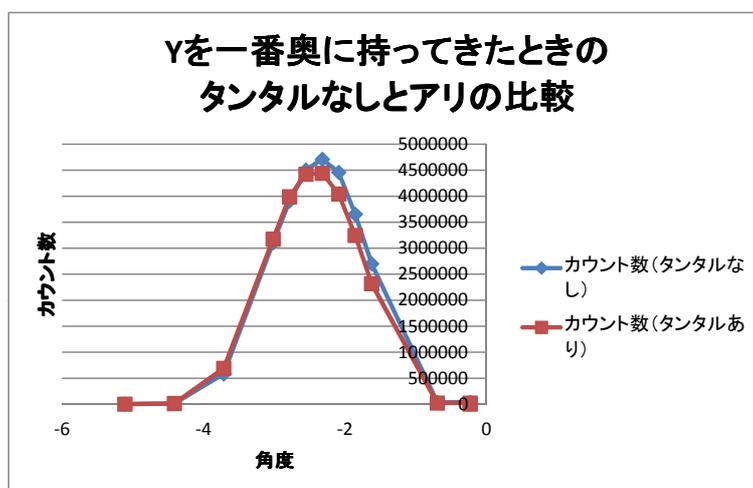


図 49: X線発生装置のビームのプロファイル。横軸は θ 角度、縦軸はAPDのカウントレート。

ムの0点、つまり θ は0度、つまり基準点として設定した。

また、図 49 から、Yの位置を一番値の大きな場所に持っていったときに、タンタルを設置してもビームにあたっていないことが分かる。

2. ビームとタンタル設置面を平行にする

θ 角を固定し α 角を変え、Yを動かすことにより、ビームとタンタル設置面が平行になる α 角を探した。この様子は、4.2.4.1の図40、図41、図42である。図50のそれぞれの α 角のカウント数の立下りと立ち上がりの中点(参照図43、図44、図45)を比較したものを図51とする

4.2.4.1より、立ち下りと立ち上がりの中点が一番小さい時がビームとタンタル設置面が平行となる α 角であるので、図51から $\alpha=-2.5$ 度と決定した

3. X線をタンタルに当てるY位置の決定

ビームとタンタルを設置する面が平行になったので、タンタルを両面テープで α 軸面にはり、実際にX線をタンタルにあて、広範囲での θ 角をみるためYの位置を決定するためのテストを行った。その結果が図52である。

この図52から、Y=50.0(X線がタンタルに当たっていない位置)、Y=33.55、Y=33.35、Y=33.15、Y=32.95、Y=32.75、Y=32.55の計7点での角度分布を θ 軸を回すことにより測定していく。

5.2.3 角度分布

アライメントが決定したので、ここからX線をタンタルに照射し θ 軸を回すことでX線がタンタルに当たった時、どのような反応をするかを測定する。

Y=50.0(X線がタンタルに当たっていない位置)、Y=33.55、Y=33.35、Y=33.15、Y=32.95、

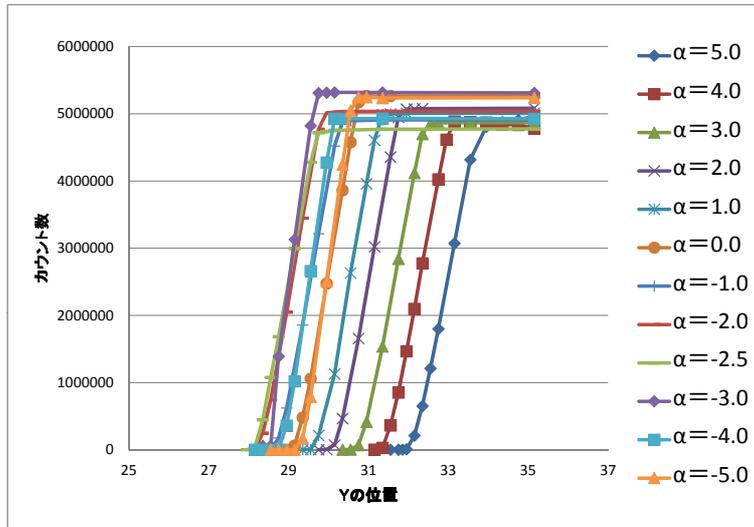


図 50: α 角決定のために、 θ 軸を 0 点に固定し、Y 軸を動かした時の APD のカウントレートの変化。グラフの色の違いは α の角度の違いを示す。横軸は Y の位置、縦軸は APD のカウントレート。

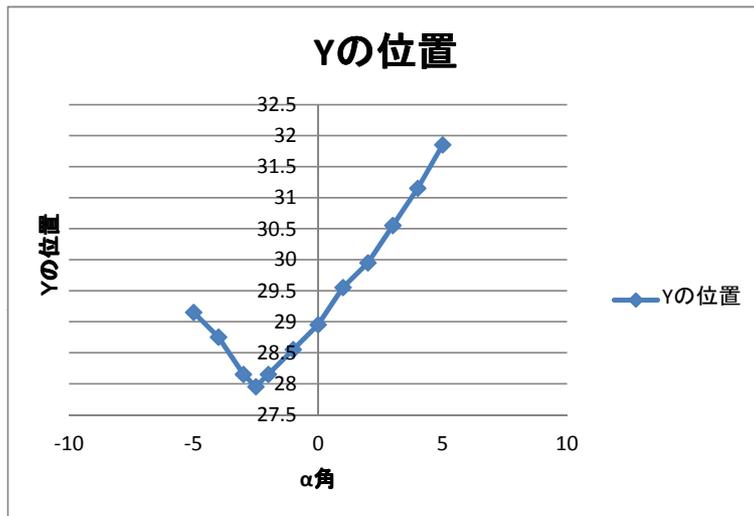


図 51: 横軸は α の角度、縦軸は Y を変化させたときのそれぞれの立下りと立ち上がりの中点。この図から、Y 変化時の中点が最小になる時の α 角が X 線とタンタル接地面が平行となった α 角とする。

Y=32.75、Y=32.55 の計 7 点での角度分布を図 53 に示す。

5.2.4 考察

ここでの実験の目的である、手順の決定を行うことができ、アライメントをスムーズに取れるようになった。手順は 5.2.5 でまとめた。また、図 53 から、マイナス付近の角度での散乱はなく、

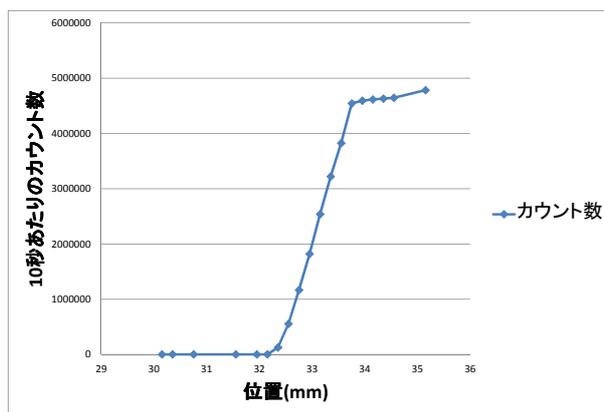


図 52: タンタルを接着した時の Y 位置ごとの変化

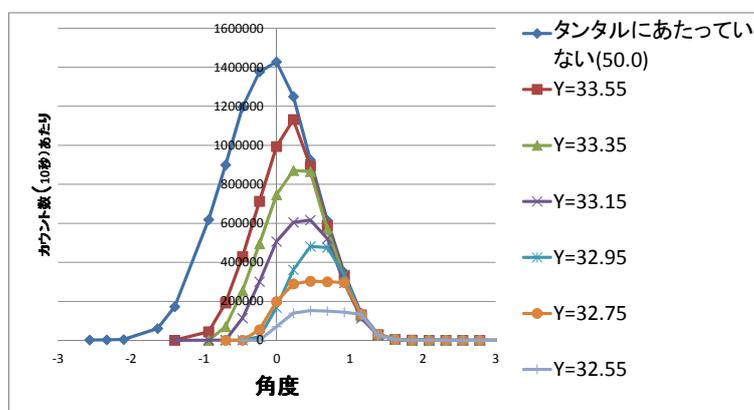


図 53: Y の位置を変化させていったときの θ 角度分布。横軸が角度、縦軸は APD のカウントレートである。青色はタンタルなしでの角度分布であり、その他は順次 Y の値を変化させていったときの分布である。

ビームがタンタルに当たらず、直接 APD に照射されている場合に比べて、マイナス付近の角度の部分が、減少していく結果となった。分布は横軸の値が大きくなりながら崩れているのではなく、分布の頂点付近のカウントレートが減少し、かつ山の頂点が平坦になっていくことから、X 線がタンタルに当たり散乱されたのではなく、タンタルに当たることで X 線が削られていったことが分かる。

5.2.5 実験手順のまとめ

第 1 回目 X 線発生装置テストでは、P F での実験手順に見通しがついた。以下にその手順を示す。

1. θ 角をまわして位置調べを行う (θ の 0 点 (ビームが一番 APD に照射する位置) を探す)。

2. θ をビームの 0 点に固定し、 α をさまざま変え、それぞれで Y を動かし、それぞれの Y 位置での APD のカウント数の変化を比較する。この形から、ビームとタンタル設置面が平行になるところを探す。
3. タンタルを α の面に貼る。
4. Y を動かし、どの Y の位置で角度分布を測定するかを決定する。
5. 4 で決定した Y の位置で θ 軸を変化させ、角度分布を APD のカウントレートから見る。

5.2.6 まとめ

この実験により実験手順が決定した。また、X線発生装置でのタンタルへの反射率の形は、タンタルにX線が照射されればされるほどグラフの形は保持したまま、APDのカウントレートが下がるものであった。次に、X線がタンタルの”ridge 構造”でない部分(平面)に当たった時に、全反射をするとバックグラウンドが増大する恐れがあるため、この全反射があるかを確かめるために第2回目の実験を行った。また、第1回目のX線発生装置での実験では、測定は、APDのカウントレートをNIMモジュールで行っていたため、多大な時間と手入力によるミスが多く発生した。実験の正確性と効率化を狙うため、次にAPDのカウントレートをCAMACとPCを使用し、第2回X線発生装置の実験を行った。

5.3 第2回目 X線発生装置でのテスト

今回の実験は2011年9月1日から9日に行った。目的は、tip部分でないところにX線を0.5度以下の角度で照射し、全反射の効果をみる。また、データ取得の効率化を狙うため、カウント数をCAMACとPCでとれるようにする。第1回目との再現性があるかを確かめる。

5.3.1 全反射の条件での測定

1. 測定結果

まず、第一回目X線発生装置での実験と同じ状況で、tip部分に照射されないようタンタルをはり、全反射の条件で測定を行った。

また、アライメントは第一回X線発生装置の時を同じように行ったうえで、測定するための位置を決定するため図54のようなデータをとった。この図54から、測定点が決定したので、tip部分でない平面にX線を照射することで、全反射がおきるかをみるため、それぞれのYの位置で角度分布の測定を行った。図55では図54で決めた、Yの位置にタンタルを設置した時のそれぞれの θ 軸を回した時のAPDのカウントレートの変化の様子である。

2. 考察

タンタルのtip部分にX線を照射した時の角度分布である図53とタンタルの平面部分にX線を照射した時の図55を比べると、大きな変化はない。どちらも、X線がタンタルに照射されればされるほど、マイナスの角度成分が削られていく。また、このグラフ(図53と図55)では、比べにくいのでそれぞれタンタルにX線が照射されていない状態のAPDのカウントレートがピークの時

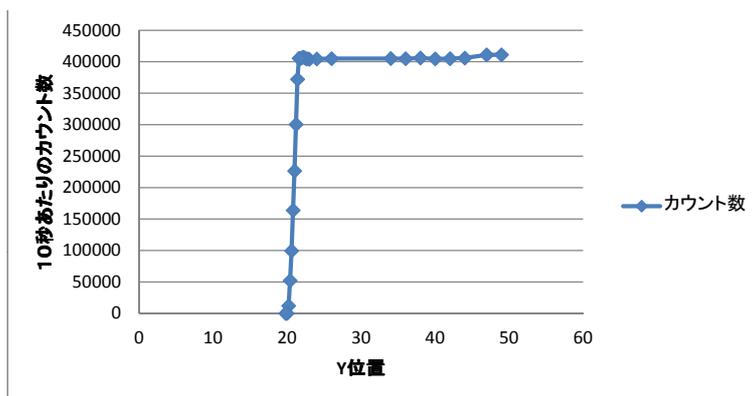


図 54: タンタルの tip 部でない平面に X 線を照射した時の Y の位置を決定するための測定。横軸は Y の位置、縦軸は角度である。

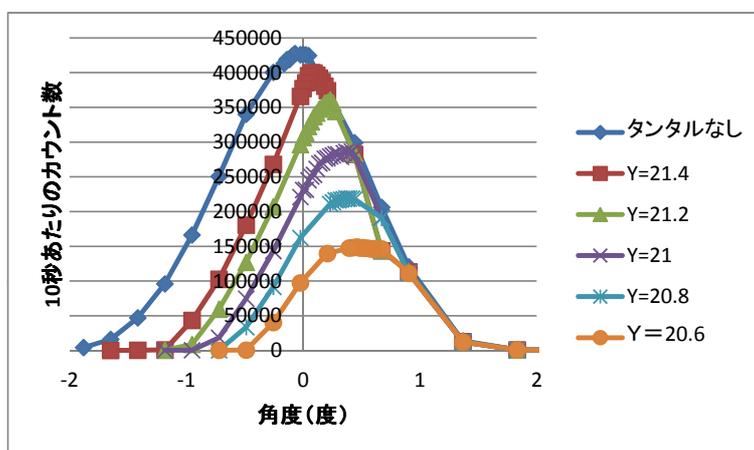


図 55: タンタルの tip 部でない平面に X 線を照射した時の角度分布。横軸は角度、縦軸は APD のカウントレート。青色はタンタルなしでの角度分布であり、その他は順次 Y の値を変化させていったときの分布である。

が 1 としたグラフを作成した。

図 56 と図 57 を比較すると、「tip-scattering の条件で実験を行ったとき」と「全反射での条件で実験を行ったとき」のグラフの形は大きくかわりはない。

5.3.2 CAMAC でのカウント数の測定

今までは、カウント数を手入力していたが、それでは時間がかかり、また間違いが発生するので APD でのカウント数を自動的に PC に記録するセットアップを作った。この状態で、X 線をタンタルの tip 部分に当てた時とタンタルの平面に当てた時のデータを測定した。

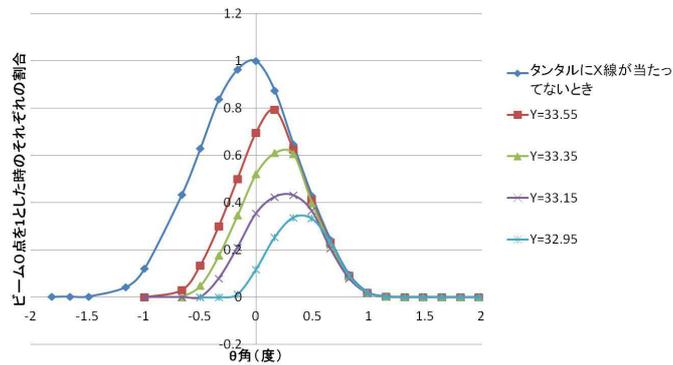


図 56: tip のある状態でのタンタル片に X 線を照射した時の様子。横軸は角度、縦軸はビーム 0 点でのピーク値を 1 としたときの割合。青色はタンタルなしでの角度分布であり、そのほかは順次 Y の値を変化させていったときのグラフである。

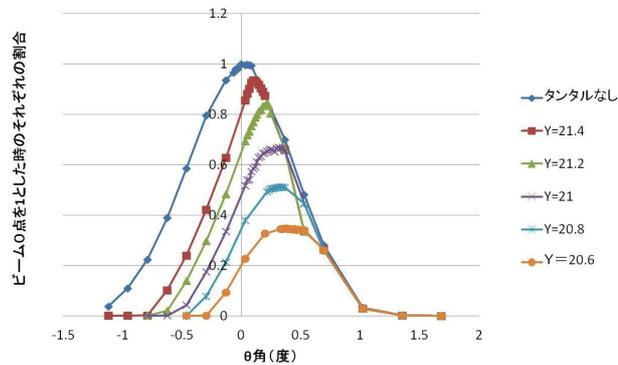


図 57: tip 部がないときのタンタル片に X 線を照射した時の様子。横軸は角度、縦軸はビーム 0 点でのピーク値を 1 としたときの割合。青色はタンタルなしでの角度分布であり、そのほかは順次 Y の値を変化させていったときのグラフである。

1, セットアップ

X 線発生装置の中は、第 1 回目との実験と同じセットアップで行った。図 58 は、APD でのカウントレートを得るためのモジュールや PC の様子である。

2, 測定結果

ここでは、5.2 で行った実験 (tip-scattering の条件の時) と、第 2 回目で行った実験 (全反射の条件の時) と実験方法としては同じようにアライメントをとり、カウント数を CAMAC でとった「tip-scattering の条件の実験」と「全反射の条件の実験」とで比較した。

tip 部の θ 角分布を測定するための Y の位置決定は図 59 であり、全反射の条件の場合では、図 60 である。この図 59 と図 60 より、 θ 角をみる Y の位置を決定した。このとき、Y の位置の決め方としては、1、タンタルに X 線が照射していない点、2、立下りの点、3、立下りと中点の 1/3 の点、4、立下りと中点の 2/3 の点、5、立下りと立ち上がりの中点、6、中点と立ち上がりの 1/3 の点、7、中点と立ち上がりの 2/3 の点の計 7 点の Y の位置で θ 角を測定した。

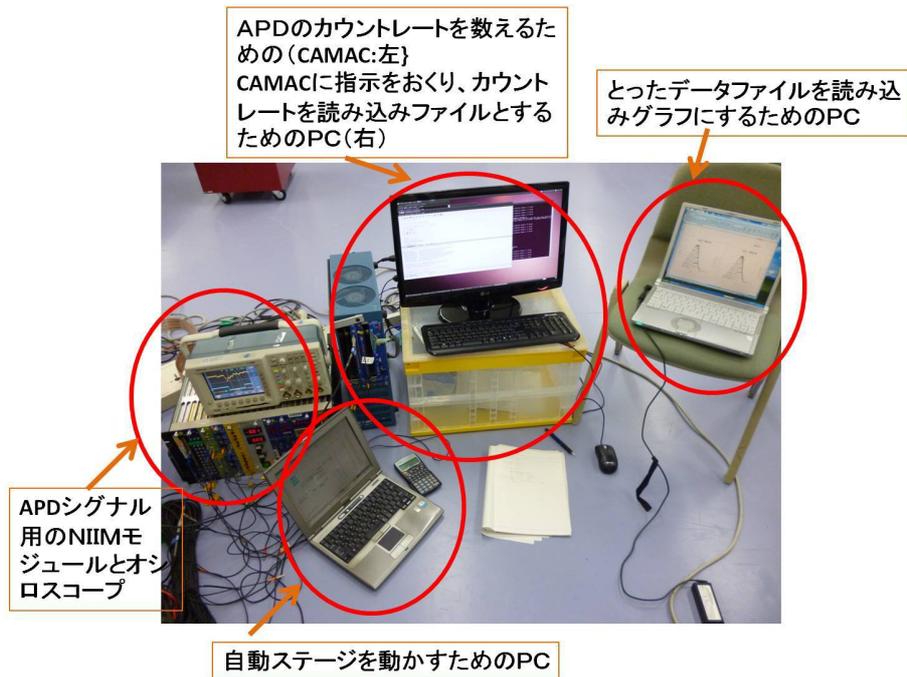


図 58: データ取得のための PC などの様子

CAMAC でとった tip-scattering は図 60 であり、CAMAC でとった全反射は図 62 である。

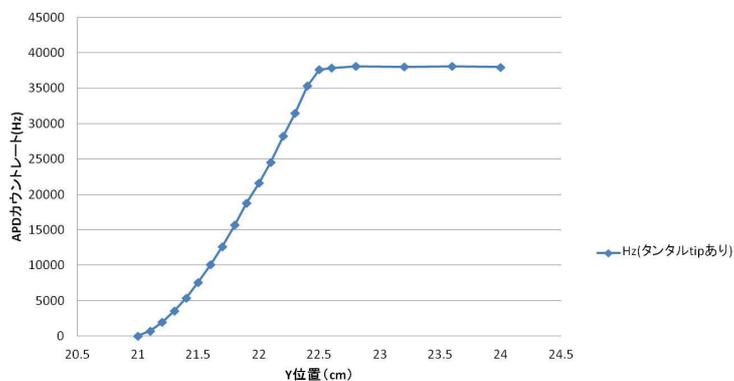


図 59: tip 部のある状態でのタンタル片に X 線を照射した時 Y の様子。横軸は Y の位置、縦軸はカウントレートである。この時 θ 軸は 0 点に固定し Y 軸を動かしている。

図 59 と図 60 を比べても、大した違いはここからは分からない。また、図 61 と図 62 は照射し始めと中点の $1/3$ の点での様子が大きく違う。tip のある図 61 はタンタル片が X 線に照射すればするほど、カウントレートが少なくなるのに対し、図 62 は、照射し始めと中点の $1/3$ の場所と照射し始めと中点の $2/3$ の場所では、APD のカウントレートがタンタルに照射していない状態の APD のカウントレートより、ピークの値がおおきくなっている。

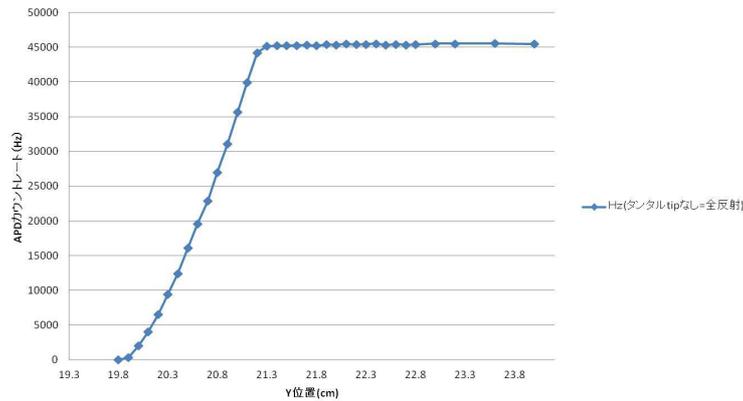


図 60: tip 部がないときのタンタル片に X 線を照射した時の様子。横軸は Y の位置、縦軸はカウントレートである。この時 θ 軸は 0 点に固定し Y 軸を動かしている。

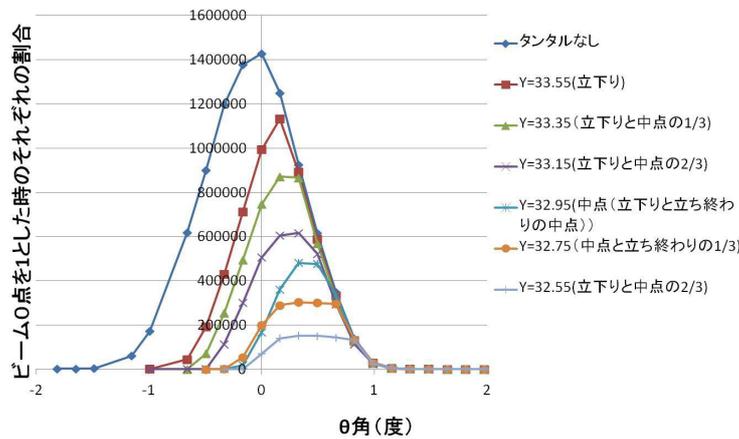


図 61: tip 部に X 線を照射した時の θ 角の APD カウントレートの様子。横軸は角度、縦軸はカウントレートである。青色はタンタルに X 線が照射されていない状態で、順次 Y の位置を変えたときのグラフである。

3. 考察

結果は、tip-scattering の条件時と全反射の条件時での形が違った。図 61 と図 62 をみると、tip 部分がないとき (図 62) のカウントレートはマイナス成分の角度がタンタルに照射するほど減っていくことは減少度が違えども tip 部分があるとき (図 61) と傾向は変わらない。しかし、図 62 を見てわかるように、立下りと中点の 1/3 と 2/3 の点では、ピークのカウントレートがタンタルに照射していない時に比べて多くなっている。これは、tip 部分がないため、広がって出ている X 線がタンタルによって削られる面積が違うからだと考えられる (図 63)。また途中増加した割合は、タンタルに X 線が照射されていない時のカウントレートを 1 とすると 1.01 程で検出器のアクセプタンスから誤差の範囲であると考え。また、tip ありなしどちらも θ のマイナス成分が削られていくということは図 63 からでも説明できる。

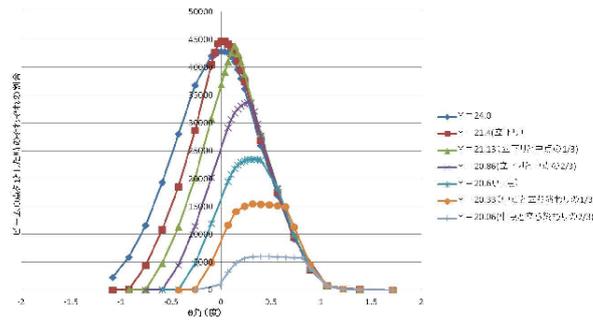


図 62: tip 部がない平面部分に X 線を照射した時の θ 角の APD カウントレートの様子。横軸は角度、縦軸はカウントレートである。青色はタンタルに X 線が照射されていない状態で、順次 Y の位置を変えたときのグラフである。

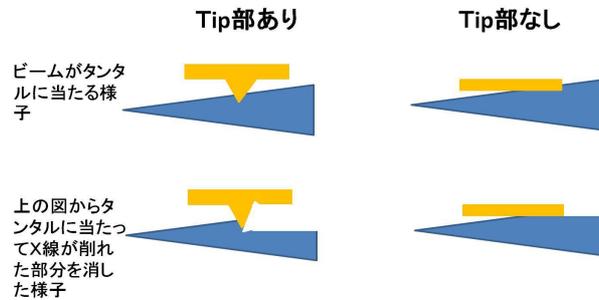


図 63: tip 部があるときとないときの X 線の様子。tip 部ありとなしのどちらも広がったビームは、タンタルでとめられ APD に入るカウントレートは θ のマイナス側では減少する。

5.4 まとめ

CAMAC で自動化してデータをとったものと、データを手で入力したものは、形は大きくは変わらなかった。よって、実験に再現性があるといえる。だが、自動化したことで、データの正確性と時間短縮に成功した。これにより、PF での試験をスムーズに時間内に収めることができる。tip-scatterin の条件と全反射の条件での実験は、CAMAC でとったデータから、全反射では一時的にカウントレートが大きくなった。これは、全反射の特性でなく検出器のアクセプタンスの誤差の範囲である。したがって、この X 線発生装置の実験からのみ考えると、tip-scattering の効果があるかはわからないようだが、PF の結果を見てみないとわからない。

X 線発生装置の実験から、データ取得までのアライメントの調整の時間短縮を達成することができたので、次に PF で実験することで平行ビームを使い、より正確な tip-scattering と全反射の測定を行う。

6 実験 2: Photon Factory でのビームテスト

6.1 目的

タンタルの tip 部に 10 keV ほどの X 線を照射した時に、X 線がどのような散乱をするかを確認する。また、tip 部でないタンタルの平面に X 線を当てた時、全反射をするかを確認する。

図 64 は tip ありのタンタル片に X 線を照射したときに考えられるグラフの説明である。図 64 からタンタルに X 線が照射されるほど、カウントレートが下がることが分かる。また、カウントレートの立下りから立ち上がりの Y position の大きさは Y スキャンでのビームサイズを表している。もし、X 線が tip 部にあたり、散乱するとしたら、図 64 からみられるビームサイズの幅は、X 線のビーム幅より大きくなるはずである。

図 65 は、APD のセンサーサイズよりビーム幅が小さい時に APD を動かした時の APD のカウ

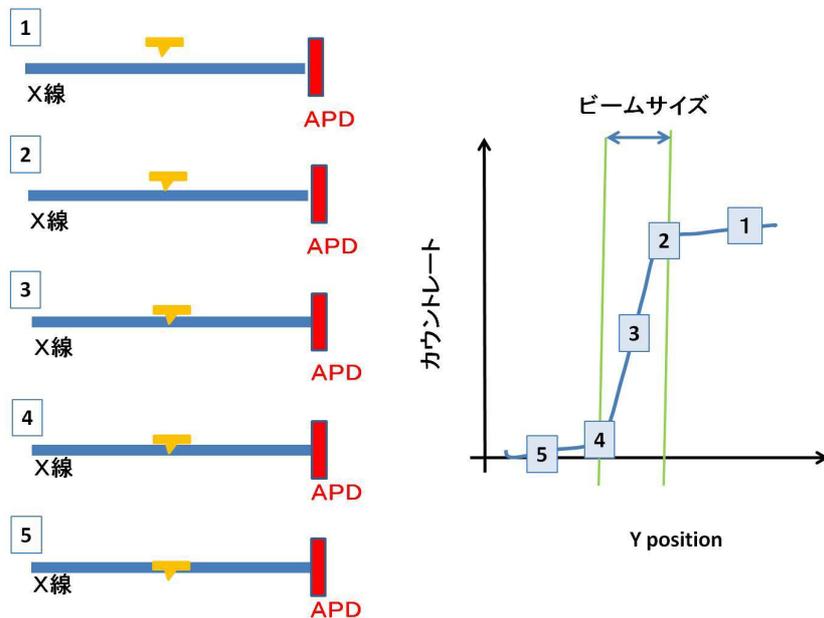


図 64: APD をビーム 0 点に固定し Y 軸を動かした時の X 線のカウントレートの様子。この場合の左図の状態は APD を固定して、Y 軸を動かした時の様子である。右図は、左図のそれぞれの状態を横軸 Y 位置、縦軸カウントレートとしグラフ化したものである

ントレートと角度の様子である。2-4 は APD に X 線が入り始めてから入りきるまで、6-8 は APD からビームが出始めてから完全に外れるまでを示している。これらの幅 (2-4 もしくは 6-8) が表しているものは、ビーム幅である。また、4 が APD にビームが完全に入りきった状態であり、6 で APD から外れ始めるまでの様子を表している。この 4-6 の幅は、センサーとビーム幅が同じサイズならガウシアン、違うサイズではピーク部がプラトーとなる。また、このプラトー部はセンサーサイズ ビーム幅を表している。

図 65 の場合、散乱が起こった場合の形は、図 65 の右のグラフでの 2-4 や 6-8 のテールが崩れた形になり X 線ビーム幅より大きくなることが予想できる。大角度で強い tip-scattering があつた場合、ビーム 0 点の位置から外れた位置にピークをもつグラフが予想できる。

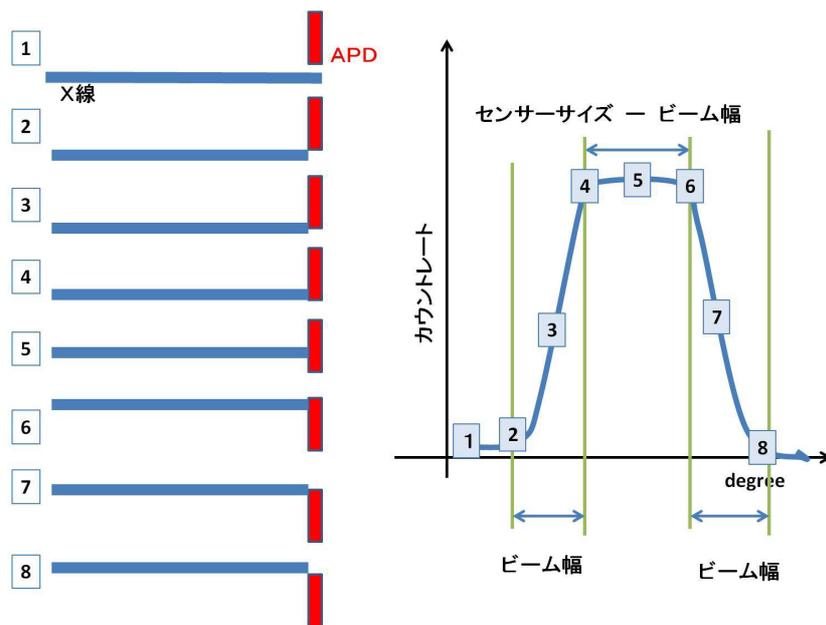


図 65: θ 軸を回転させたときの X 線と APD の様子。この場合の左図の状態は Y 軸を固定し θ 軸を変化させた時の様子である。右図は左図のそれぞれの状態を横軸角度、縦軸カウントレートとしグラフ化したものである。

6.2 セットアップ

図 66 と図 67 は、今回使用した PF 内の 1 つのハッチ（実験を行う部屋）の中の様子と外の様子である。中も外も、X 線発生装置のときと同じセットアップで実験している。また、X 線検出器 (APD) も同じものを使用している。

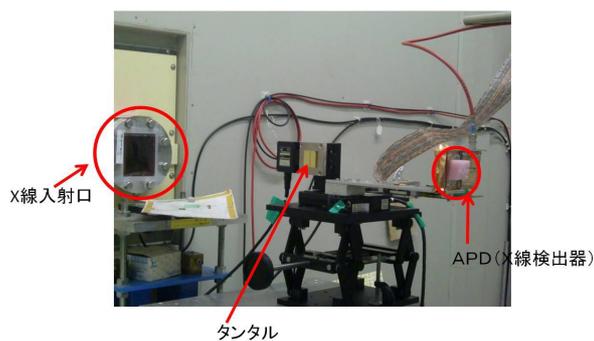


図 66: ハッチの中のセットアップの様子



図 67: ハッチの外の様子

6.3 X 線を当てた時の様子

図 68 は、APD に X 線を当てた時の様子である。ここから、40 mV 弱出力していることが分かる。鉄線源で測定した時のデータ (図 47) から考えると、この出力は妥当であるといえる。

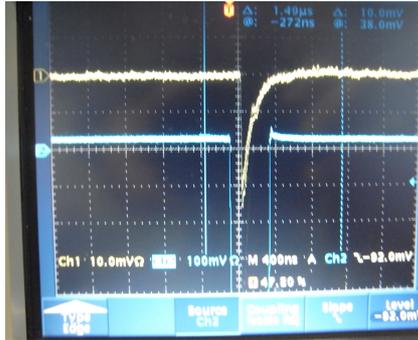


図 68: APD に X 線 (10 keV) を照射した時のオシロスコープの様子

6.4 アライメント

アライメントは、X線発生装置のときと同様に測定した。図 69 はタンタル片に X 線が照射されていない状態で、 θ 軸を回転させ、APD のカウントレートを測定したグラフである。この図 69 よりビーム 0 点を決めた。図 69 から $\theta=0$ 度となる場所を -0.7 度とする。

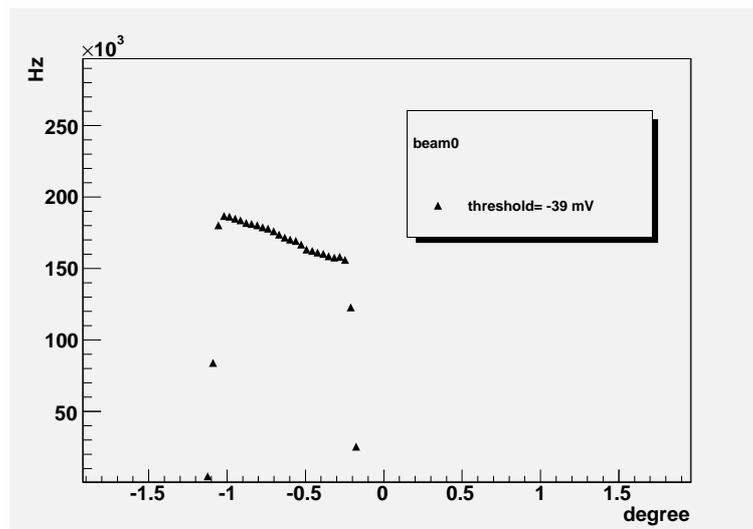


図 69: PF でのビームのプロファイル。この時、タンタルは X 線に照射されていない位置にあり、 θ 軸を回転させたときの APD のカウントレートを見ている。横軸は角度、縦軸はカウントレートである。

図 70 は APD を固定し、タンタルを接地していない状態で Y 軸を動かし APD のカウントレートを測定したグラフである。図 70 より、一番立下りと立ち上がりの Y の位置が小さい α 角である $\alpha = -0.21$ 度と決定した。

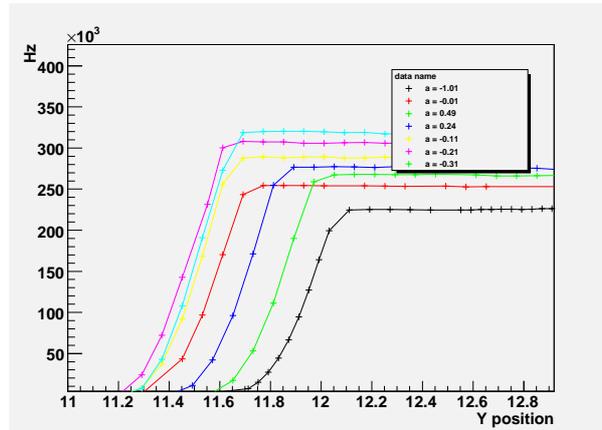


図 70: α 角決定のために、 θ 軸はビーム 0 点に固定し、Y 軸を動かした時の APD のカウントレートの変化。グラフの違いは、 α の角度の違いを示している。横軸は Y の位置、縦軸は APD のカウントレートである。

6.5 測定結果

1、Tip-scattering

アライメントができたので、タンタル設置面にタンタルをつけ、どの Y の位置で θ 角の分布をみるかを決定した様子が、図 71 である。そのうえで、 θ 角を回し測定した。

図 71 より、1.Y=48.90(タンタル片に X 線が照射していない場所)、2.Y=16.04、3.Y=16.00、4.Y=15.84(立下り)、5.Y=15.73(立下りと中点の 1/3 の点)、6.Y=15.66(立下りと中点の 2/3 の点)、7.Y=15.60(立下りと立ち上がりの中点)、8.Y=15.53(中点と立ち上がりの 1/3)、9.Y=15.46(中点と立ち上がりの 2/3 の点)、10.Y=15.40(立ち上がり) の計 10 点での θ 角分布を測定した。その様子が図 72 である。図 72 のようなグラフを得たが、これは、タンタルに照射していない位置 (1) から立下りと中点の 1/3(5) の点まで、ピークのカウントレートが増え続ける。(5) の位置から (6) の位置に移動すると大きくカウントレートが少なくなる。しかし、形は保存したままである。また、蛍光板をタンタルの後ろ(検出器側)にはり、X 線のビームの形を目で見た。(5) の状態まではビーム幅が 0.8mm ほどあったが、7 の状態で蛍光板に写ったビーム幅は 0.4 mm で、ここでは必ず、X 線がタンタルに当たっていることが分かった。また、X 線の形は広がっている成分はなかった。

2、タンタル平面への X 線の入射 (全反射)

tip 部分に入射させるのと同様に、タンタルの平面部分に X 線を当てるように、タンタルを 90 度回した。また、全反射をするかどうか見たいため、X 線とタンタル設置面が平行のところから全反射の条件である 0.5 度以下の入射を狙うため、タンタル設置面を 0.4 度回転させた。

アライメントができたので、どの Y の位置で θ 角分布をみるかを決定した。その様子が、図 73 である。

図 73 より、1.Y=48.95(タンタル片に X 線が当たっていない場所)、2.Y=15.55、3.Y=15.15、4.Y=15.03(立下り)、5.Y=14.96(立下りと中点の 1/3 の点)、6.Y=14.9(中点と立ち上がりの 2/3

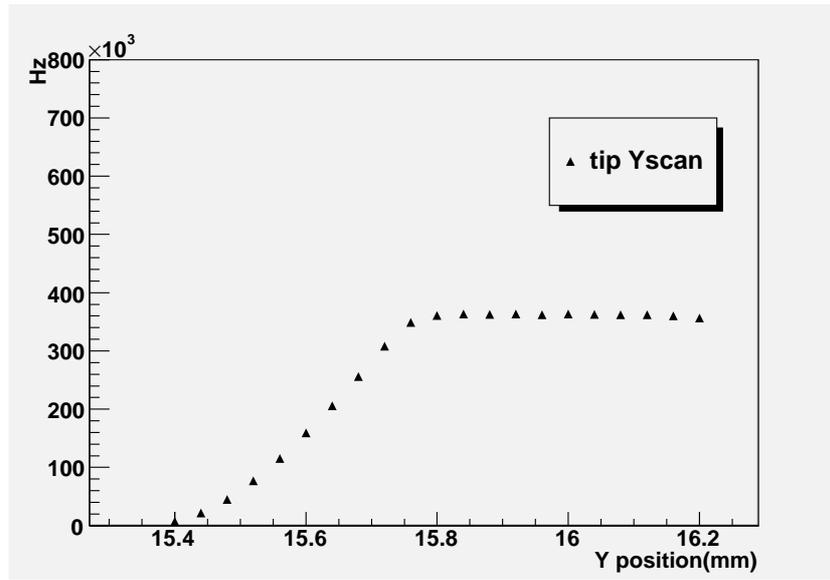


図 71: tip 部のある状態でのタンタル片に X 線を照射した時の Y の位置とカウントレートの様子。この時、 θ 軸は 0 点に固定し、Y 軸を動かしている。横軸は Y の位置、縦軸は APD のカウントレートである。

の点) 7.Y=14.83 (立下りと立ち上がりの中点) 8.Y=14.76(中点と立ち上がりの 1/3)、9.Y=14.7 (中点と立ち上がりの 2/3 の点)、10.Y=14.63 (立ち上がり) の計 10 点での θ 角分布を測定した。その様子が図 74 である。

図 74 より、タンタル平面に X 線を当てた時は、tip 部に当てた時のようなカウントレートが途中から増えて、また減っていく傾向はない。タンタルに照射すればするほどカウントレートはグラフの形を保持したまま減少していく。

6.6 考察

(tip-scattering 条件時の考察)

まず、APD をビーム 0 点に固定し Y を動かした時の分布である図 71 について考える。図 64 より立下りから立ち上がりまでの Y 位置の差がビームサイズであるので、図 71 でのビームサイズは、0.38 mm であることがわかる。しかし、これは tip 部にあたっての反応であることに注意したい。

次に、図 71 からどの Y 位置でタンタルに X 線が照射しているかを考え、照射していると考えられる点にタンタル片を固定し θ 軸を回転させたときの APD のカウントレートの分布である図 72 について考える。ここで分布の形を考えたいため図 72 の両端部からタンタルに X 線が照射されていない状態のビーム幅を考える。タンタルに X 線が照射してないときである 1 の位置での立ち上がりと立下りから導き出せるビームサイズは 0.11 度であり、これを変換すると 0.68 mm となる。これら 2 つのグラフより導いたビーム幅を以下にまとめる。

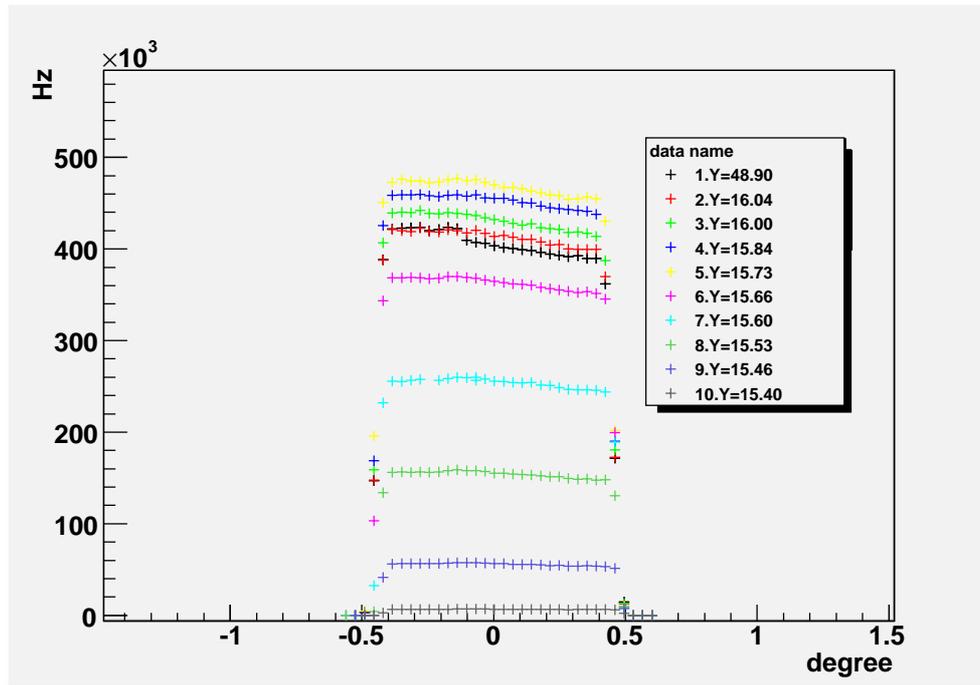


図 72: tip 部分に X 線を照射したときの θ 角を回転させたときの APD のカウントレートの様子。黒色はタンタルに X 線が照射していない状態である。以下 Y 位置を順次変えたときのグラフである。横軸は角度、縦軸はカウントレートである。

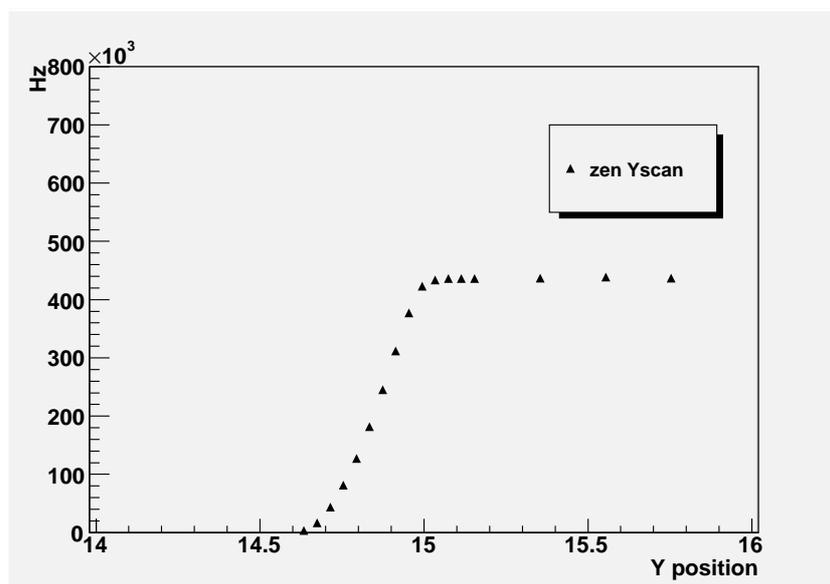


図 73: タンタル平面部分へ X 線を照射した時の Y の位置とカウントレートの様子。このとき θ 軸は 0 点に固定し Y 軸を動かしている。横軸は Y の位置、縦軸は APD のカウントレート。

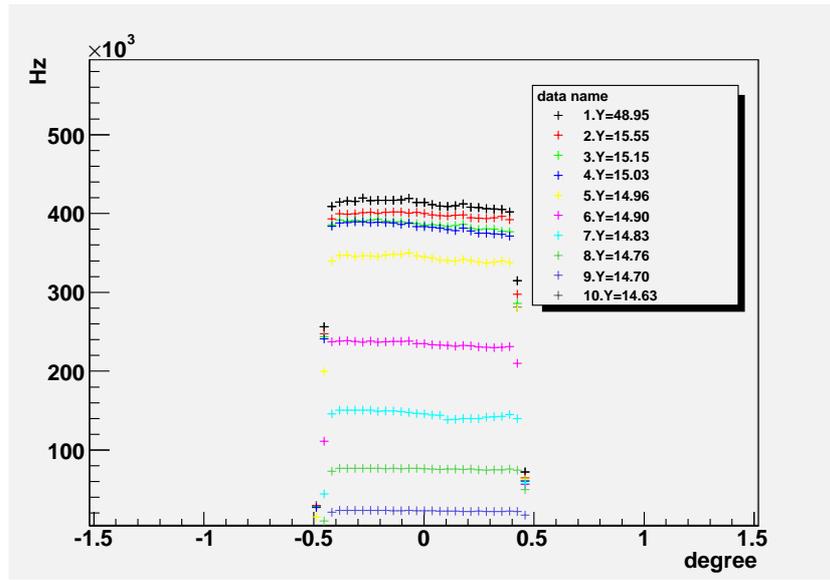


図 74: タンタル平面部に X 線を照射し、 θ 角を回転させた時の APD のカウントレートの様子。黒色はタンタルに X 線が照射していない状態である。以下 Y 位置を順次変えたときのグラフである。横軸は角度、縦軸はカウントレートである。

- 図 71(Y スキャン) から Y スキャンから tip 部ありでのビームサイズ;0.38 mm、
- θ 角度分布からのタンタルなしでの両端部から考えるビームサイズ;0.68 mm

Y スキャンからと両端部から考えられるビームサイズはファクターの範囲では同じである。また、ビームの設定幅は、0.8mm である (蛍光板で測定した (図 75))。このビーム設定幅に比べると、APD でのカウントレートのグラフから見積もったビーム幅は小さい。もし散乱して、広がりを持っていたならば Y スキャンからのビームサイズが θ 角度分布から読み取った値 (タンタルなしでの X 線照射時) より大きいはずである。このグラフの比較からはそのような散乱の傾向は見えない。

さらに、図 71 のテール部分の形に着目する。図 76 と図 76 のグラフは、図 71 の左部分と右部分を拡大し、Y 軸を log にしたものである。また、それぞれの右図の時の APD 位置でのカウントレートの変化を示している。図 76 はビームとタンタル試験片が重なった割合を示している。なぜなら、散乱があった場合、図 76 の右図の場所に APD があるため、散乱の傾向が見えないはずであるからだ。図 77 は、散乱した様子を示している。なぜなら、散乱があると図 77 の右図の場所に APD があるため、散乱の傾向が見えるはずであるからだ。図 76 と図 77 では Y 位置ごとのカウントレートの減少度の様子が違うことから、散乱があることが分かる。レートの変化のある角度範囲は 0.46 - 0.53 度の範囲に収まる。ここから最大 0.1 度での乱反射は起こりえる。

一方、今回角度分布を図 72 において、-0.52 度から + 0.62 度の範囲でしか実際に測定しなかった。センサーサイズを考えると、これは -1.0 度から + 1.08 度の約 2 度の範囲にあたる。また、今回の実験で見たいものは前方散乱であるのでビーム 0 点の位置から + の方向に出るものが問題となる。そこで、APD 位置が + 0.62 度でのタンタル照射位置とカウントレートを考える。表 3 はタンタル片の位置とカウントレートを示したものである。この表 3 より、必ず X 線がタンタル試験片に照射している位置である 8 の状態に注目する。ここから、バックグラウンドである 1 での値を引くと 1 秒当たり 34 カウントの反射がある。入射 photon は、 4.00×10^5 であることから、反射

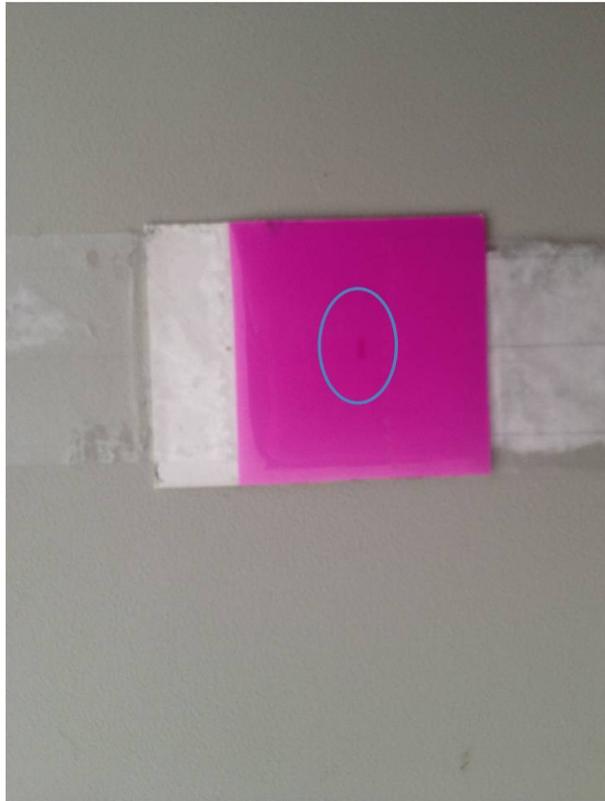


図 75: ビームを蛍光板に写した様子。うすくビームがうつし出されている。

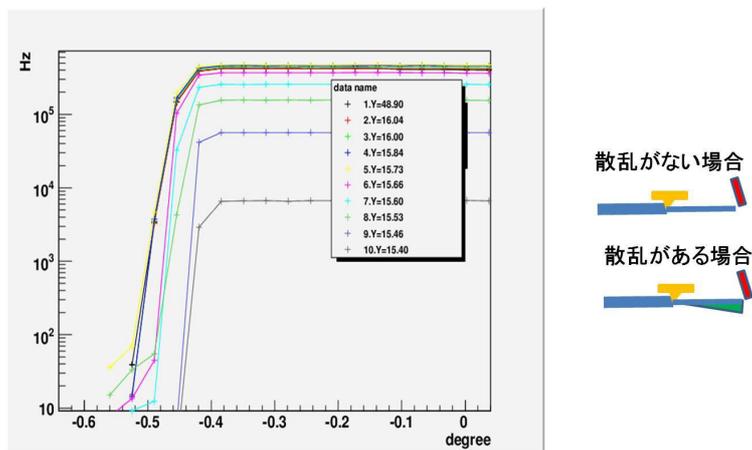


図 76: 図 72 の左部分。横軸は角度、縦軸はカウントレートを log にしたもの。右図の絵の時の A P D 位置での様子を表す

photon は、+ 0.62 度付近において 8.5×10^{-4} となる。

したがって、この実験から前方 + 0.2 度から + 1.1 度の範囲内には、強い tip-scattering や tip に当たることによる乱反射は空気中の場合で、入射粒子の 8.5×10^{-4} 存在する。

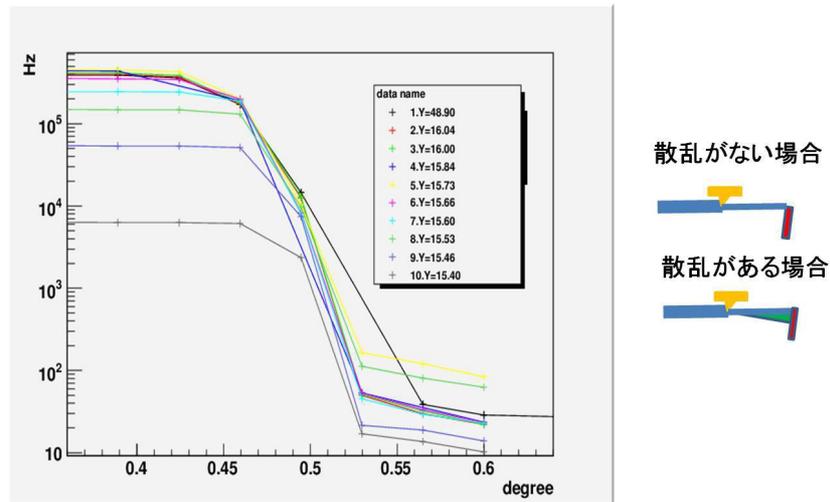


図 77: 図 72 の右部分。横軸は角度、縦軸はカウントレートを log にしたもの。右図の絵の時の A P D 位置での様子を表す

(全反射の条件時の考察)

全反射の条件で測定した図 74 を考える。この図 74 では、X線がタンタルに照射されるほど、カウントレートのピークの値は減少しており、ピークの場所は変わっていない。

理論上、全反射は入射角と同じ角度でおこる。全反射が起こると X 線がタンタルに照射していない時である位置 (1=48.95) から今回 0.4 度の入射角で X 線を反射させたので入射ビームの位置から α 角が 0.4 度 + 反射角 0.4 度の 0.8 度のところにピークがずれるはずである。また、APD のセンサーの大きさやビームサイズから考えるとピークは 0.33 度付近から 1.27 度付近まで幅をもったピークを持つことが予想される。金の理論 X 線反射率は 10keV で入射角 0.4 度の場合、反射率が 0.5 である。したがって、全反射をすればタンタルに X 線が照射していない時のカウントレートが半減し、0.33 度から 1.27 度の位置にピークを持ちテール部分が崩れたグラフになると予想される。

今回測定したのは、- 0.6 度から + 0.7 度である。予想から考えれば、0.7 度付近ではカウントレートは約 2×10^5 Hz あるはずである。しかし、測定結果は、どの位置においても 10-20 Hz である。ここからは、全反射の傾向は見えない。

次に、図 74 のテールの部分を考える。図 78 と図 79 は図 74 のテール部分を比較するため拡大し縦軸を log スケールにしたグラフである。tip-scattering の考察時と同じように図 74 の左部分である図 78 は、ビームとタンタル試験片が重なった割合を示しており、また図 79 では散乱がある場合、散乱の傾向を示す。したがって、図 78 と図 79 の Y 位置ごとのカウントレートの減少度が違えば、散乱している。図 78 と図 79 はグラフに違いがあり、散乱していることが分かる。レートの変化のある角度範囲は 0.42 度 から 0.53 度の範囲に収まったことから最大 0.11 度での乱反射は起こりえる。

よって、タンタル平面部に X 線を照射することで、X 線強度が減少し、0.11 度以下の範囲で乱反射がおこったと考えられる。また、全反射は金の場合 5 nm 以下では均一な膜が形成されず、50 nm 以上になると表面粗さが大きくなり反射率は減少する。全反射に最適な金の厚みは 30-50 nm である [14]。今回使用した金は 100 μm であったので、表面粗さによって全反射の傾向を示さなかったと考える。よってこのタンタル試験片を作った金の状態では、反射粒子は入射粒子の 5.0 \times

タンタル片の位置	カウントレート (Hz)
1.Y=48.90(タンタル片にX線が照射していない場所)	28
2.Y=16.04	22
3.Y=16.00	22
4.Y=15.84(立下り)	23
5.Y=15.73(立下りと中点の 1/3 の点)	83
6.Y=15.66(立下りと中点の 2/3 の点)	23
7.Y=15.60 (立下りと立ち上がりの中点)	22
8.Y=15.53(中点と立ち上がりの 1/3)	62
9.Y =15.46 (中点と立ち上がりの 2/3 の点)	13
10.Y=15.40 (立ち上がり)	10

表 3: 図 72 におけるそれぞれのタンタルの位置での APD(0.62 度の位置で) のカウントレート

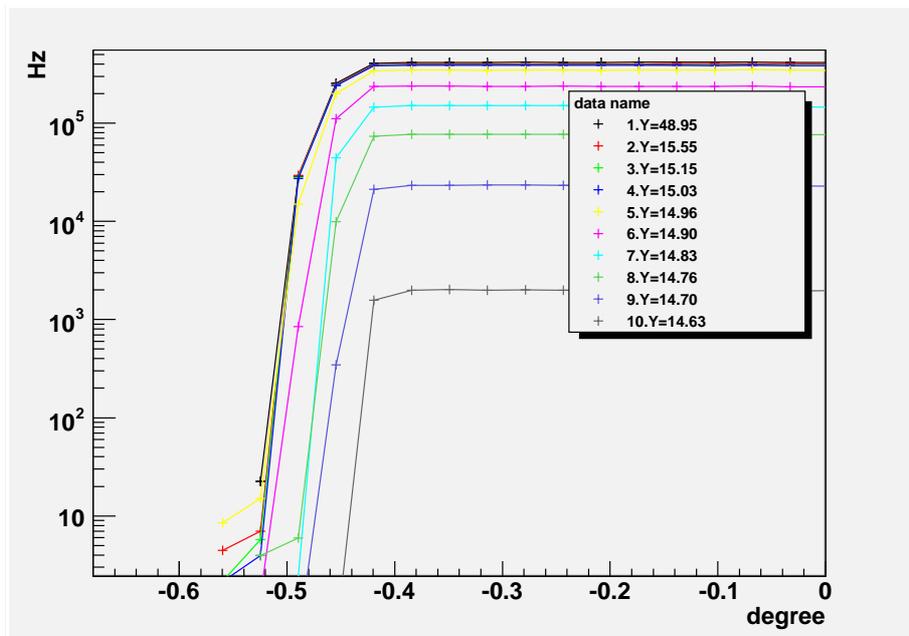


図 78: 図 74 の左部分 (Y 軸を log スケールにしたもの)

10^{-4} 存在する。

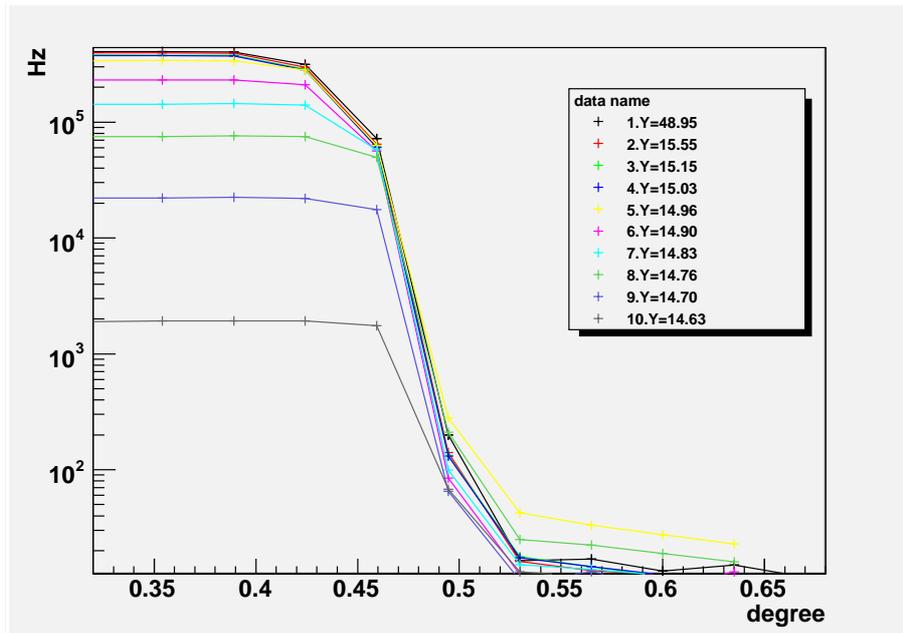


図 79: 図 74 の右部分 (Y 軸を log スケールにしたもの)

6.7 PF をふまえた X 線発生装置での考察と PF との比較とシミュレーション結果からの評価

α 角決定のためのグラフについて

α 角の分布 (図 50、図 70) では、X 線発生装置の結果においても PF の結果においても、 α 角を変え測定するたびに、カウントレートのピークの値が異なる。もし、APD の温度依存性が原因であるならば、タンタルに X 線が照射されていない場所でのカウントレートが一定にはならず、不安定な形になるはずである。ここから、APD の温度依存性が原因ではないと考えられる。また、HV の不安定性が原因の場合でも同じことが言える。今回の実験において、このカウントレートのピーク位置が変化した原因はわからない。

tip-scattering について

PF の結果から X 線発生装置の結果を考える。X 線発生装置の角度分布のグラフ (図 61) では、X 線がタンタルに照射されていない状態でグラフのピーク部がプラトーとなっていない。これは、X 線発生装置ではビームが入射口から遠くなるほど広がるり、ビームの強度がガウシアン形で分布し中心部にピークをもつものになっているためである。図 61 は、タンタルに X 線が照射されればされるほど、ピーク部がプラトーとなる。この理由は、ビームの広がった端の部分では強度の違いがあまりないのではないのかと考える。しかし、理由はわからない。

図 61 の形は、X 線がタンタルに照射されるほど、グラフの横幅が乱れ大きくなるという傾向はない。ここから、tip による乱反射は起こりにくいと考えられる。

また、X 線発生装置の実験 (図 61) では、 θ が 0 度から 90 度までの分布を測定したが、ビーム 0 点以外での tip-scattering による強い反射によるピークは見えなかった。ここから、広範囲での強い

tip-scattering は、ガウシアンで広がったX線の場合、みえない。PF での実験では、詳細な乱反射の結果を調べた結果、最大 0.1 度の乱反射がおりえることがわかった。

全反射について

X線発生装置で全反射の条件において測定した図 62 と PF で測定した図 74 を考える。この 2 つのグラフは、入射角度 (ビーム 0 点) から大きくずれたところにピークをもつという傾向はない。PF の結果から乱反射においては最大 0.11 度おこりえることがわかった。

予想される反射角度と実験結果の比較

図 80 のように、A から E の点を設定し、シンクロトロン放射が各点にあたった時の反射角を以下に示す。このとき、直線部 (Be) に当たる反射角度が問題となる。

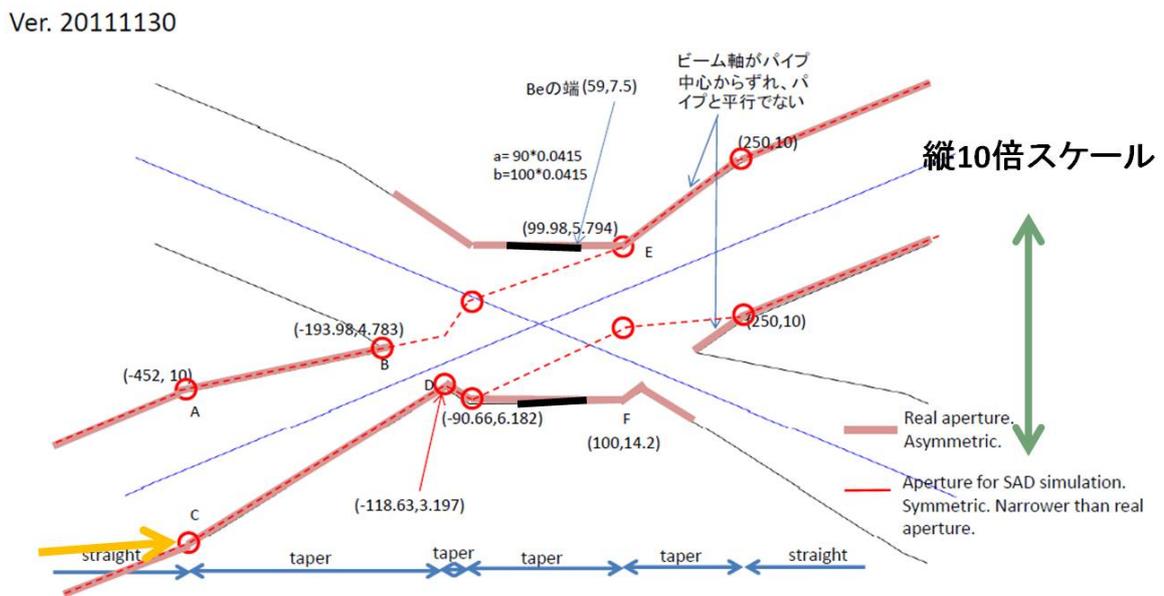


図 80: シンクロトロン放射が A から D に当たった場合の反射角を調べるためのセットアップ

1. A ~ B に当たった場合
 - 直線部の E の側には当たらない。F の側に当たるには、2.5 度以上の散乱角が必要である。
2. 放射光がビームと平行に入ってきて C に当たった場合
 - (a) 角度変化が 0-1.16 度の場合は、テーパの角度以下だから次の ridge に当たって止まる。
 - (b) 角度変化が 1.16-1.64 度の場合は、直線部に当たらずに抜ける。

- (c) 角度変化が 1.64-1.96 度の場合は、直線部 (Ti) に当たる。
- (d) 角度変化が 1.96 度以上の場合は、直線部 (Be) に当たる。

3. 放射光がビームと平行に入ってきて D に当たった場合

次の ridge は無いから、

- (a) 角度変化が 0-2.36 度の場合は、直線部に当たらずに抜ける。
- (b) 角度変化が 2.36-3.45 度の場合は、直線部 (Ti) に当たる。
- (c) 角度変化が 3.45 度以上の場合は、直線部 (Be) に当たる。

したがって、一番低角度で反射する危険な経路はシンクロトロン放射が C に当たり、1.96 度以上の反射をした場合である。よって、反射角が 1.96 度未満であれば直線部分を貫通しピクセル検出器に影響を及ぼさないといえる。

PhotonFactory での実験結果は、最大で 0.11 度の反射が見られた。また、PhotonFactory では、0.6 度までしか測定していない。X 船発生装置の実験においては、1.96 度以上測定したが、反射は入射粒子の 4 ケタ落ちであった。

6.8 tip-scattering の結果を SR シミュレーションに入れるためのまとめ

現在、SR 生成およびビームパイプの GEANT4 を用いたシミュレーションの評価はすでに行われている。そこで今回実験で評価した反射の影響をモデルに入れ、改めて検出器への影響を確認するため反射の影響をまとめる。ここでまとめるのは、Photon Factory で tip 部に X 線を当てた時の結果である。

6.8.1 単位の定義と求める量

図 81 のように、タンタル試験片の tip 部に N_0 個の photon を入射したとき、検出器でとらえられる反射 photon から反射断面長という量を定義し求める。

まず、入射粒子密度: n_0 [Hz/cm²]、W: tip の奥行 [cm]、h: tip の有効高さ [cm]、 N_0 : tip 部への入射粒子 [Hz]、 $r(\theta)$: 反射確率の角度関数と定義したとき

tip 部分に当たる photon の数は

$$N_0 = n_0 \times W \times h \quad (9)$$

である。

また、角度 θ から $\theta + \Delta\theta$ の範囲に反射する photon 数 [Hz] は

$$\text{反射 photon} = N_0 r(\theta) \Delta\theta \quad (10)$$

式 9 と式 10 より、”反射断面長”を $r(\theta)h$ と定義したとき、

$$r(\theta)h = \frac{\text{反射 photon} / \Delta\theta}{n_0 W} [\text{cm/degree}] \quad (11)$$

となる。

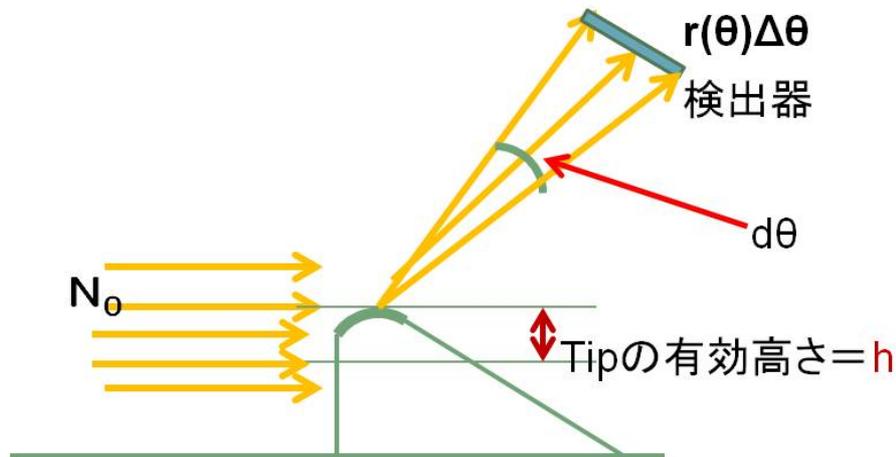


図 81: タンタル試験片の tip 部に photon が入射したときの概念図

6.8.2 Photon Factory の結果

表 3 の APD 位置が $\theta=0.62$ でのタンタル試験片の tip 部に X 線をあてた結果に注目する。統計誤差のばらつきより反射 photon カウント数のばらつきが大きく、最大で $\pm 100\%$ 程度ばらついている。したがって、反射 photon=最大反射 photon カウント数とする。反応断面長を計算すると前方 0.2-1.1 度の範囲での平均値: $4.0 \times 10^{-5} \text{cm/degree}$ となる。前方 0.2-1.1 度としたのは、 $\theta=0.62$ に APD のセンサーサイズを考慮したためである。

6.9 まとめ

PF の安定した平行ビームで、タンタルの tip 部での scattering があるのか、また、平面部での全反射があるのかを測定した。tip 部への X 線を当てた時に、乱反射は最大で 0.1 度の範囲で起こりえる。また、tip 部前方 0.2 度から 1.5 度の範囲での散乱・反射は入射粒子の 1.5×10^{-4} 存在する。

一方、平面部分に当てた時は、全反射があれば起こる条件で実験をおこなった。乱反射は、最大 0.11 度の範囲で起こりえる。0.2 度から 1.5 度の範囲での散乱・反射は入射粒子の 5.0×10^{-4} 存在した。

シミュレーションにより、反射角が 1.96 度未満であれば直線部分を貫通しピクセル検出器に影響を及ぼさないとわかっている。実験結果を 1.96 度と比較すると、十分小さい。また、大角度散乱については、X 線発生装置で確かめたが 1.96 度の際の散乱は入射粒子の 4 ケタ落ちであった。

最後に、反射断面長という単位を定義し、tip 部に 10keV の X 線を当てた時の値を確認した。結果は、前方 0.2-1.1 度の範囲での平均値: $4.0 \times 10^{-5} \text{cm/degree}$ となった。今後、これらの結果を SR シミュレーションに入れ、ピクセル検出器への影響を確認する必要がある。

7 まとめ

SuperKEKBの衝突点近くで発生するシンクロトロン放射がビーム衝突部の直線付近に入らないよう考えられた”ridge 構造”の鋸歯のギザギザ部の頂点に当たった時にどのような反応をするか、また平面部に当たった時に全反射が起こるかをまとめたものである。

まず、X線照射実験で使用するセットアップを決定した。X線源には、時間に縛られず使用できることのできるX線発生装置と平行Xビームを得ることのできるKEKのPhotonFactoryを使用した。X線照射ターゲットとしては、厚さ1mmのridge構造を施した出っ張りをつけ、金メッキを100 μm 施したタンタル試験片を使用した。X線検出器としては、5-20 keVほどの光感度がよいリーチスルー型APDを使用した。

次にX線発生装置を使用し、PhotonFactoryでの実験方法を決定した。これは、PhotonFactoryではX線照射のできる時間が限られ、手早く準備やアライメントをしなければならないからである。また、X線発生装置でのtip-scatteringの条件での測定や全反射での条件での測定も行った。このX線発生装置の実験から、X線発生装置のような広がったビームではtip部にX線が照射することによる、乱反射は見えなかった。また、tip部による大角度での強いX線の反射は見えなかった。全反射の条件で行った実験においては、入射角度と同じ大きさの反射角で反射するという全反射の特性は見えなかった。

最後に、PFでの実験を行いtip-scatteringや全反射の条件で実験を行った。ビームの分布がtip部に当たることにより、分布が崩れる乱反射や強い散乱であるtip-scatteringを測定した。tip部へのX線を照射した時に、乱反射は最大で0.1度の範囲で起こりえる。また、tip部前方0.2度から1.1度の範囲での散乱・反射は入射粒子の 1.5×10^{-4} 存在する。

平面部分に照射した場合、全反射があれば起こる条件(入射角0.4度)で実験をおこなった。乱反射は、最大0.11度の範囲で起こりえる。また、0.2度から1.1度の範囲での散乱・反射は入射粒子の 5.0×10^{-4} 存在した。したがって、平面部の入射時での全反射の傾向は見えなかった。これは、金メッキ厚が十分大きいことが起因していると考えられる。

実験結果をtip部にSRが当たった時の最小反射角度と比べる。シミュレーションにより、反射角が1.96度未満であれば直線部分を貫通しピクセル検出器に影響を及ぼさないとわかっている。実験結果を1.96度と比較すると、十分小さい。また、大角度散乱については、X線発生装置で確かめたが1.96度のときの散乱は入射粒子の4ケタ落ちであり十分小さいものであった。

最後に、反射断面長という単位を定義し、tip部に10keVのX線を当てた時の値を確認した。結果は、前方0.2-1.1度の範囲での平均値: $4.0 \times 10^{-5}\text{cm/degree}$ となった。今後、これらの結果をSRシミュレーションに入れ、ピクセル検出器への影響を確認する必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり、お世話になりました方々に紙面をお借りしてお礼申し上げます。

まず、このような素晴らしい国際的な実験に参加できる機会を与えてくださった、高エネルギー物理学研究室の林井久樹教授、宮林謙吉准教授に深く感謝致します。林井久樹教授には、実験に対する助言をいただき感謝しております。宮林謙吉准教授には、多く心配をおかけし、修士論文を見ていただき感謝いたします。

本研究では、KEKのSVDメカミーティングの皆様大変お世話になりました。発表をさせていただくことで、多くのことを気付かせていただき、サポートを多くしていただきました。

KEKの田中秀治准教授には、修士1年の冬から非常に多くのご指導を頂きました。何もわかっていなかった私に適切な指導をしてくださり、なんとか研究を進める事が出来ました。また、KEKに滞在している間は研究だけでなく様々な面でお世話になりました。ご迷惑ばかりおかけしたにもかかわらず、最後まで見ていただき、深く感謝しております。

KEKの後田裕教授には、実験に対する助言や修士論文を見ていただきました。また、本研究を行うきっかけを作ってください深く感謝しております。KEKの中山浩幸助教には、バックグラウンドの基礎から丁寧に教えていただき、実験の助言をしていただきました。修士論文においては細かいところまで見ていただきました。特に考察では大変助けていただき、深く感謝しております。原康二助教には、実験に対する助言をしていただきました。とくにデータの処理に対し助けていただきました。深く感謝しております。坪山透講師には、Photon Factoryでの実験のサポートから助言、修士論文を見ていただきました。また、助言のおかげで実験の本質に気づかせていただきました。深く感謝しております。

KEKの金澤健一教授には、実験に対する助言にとっても助けられました。助言のおかげで毎回考察が進みました。また、ビームパイプについて詳しく教えていただき、実験の目的の理解が進み、深く感謝しております。

KEKの高力孝技官には実験に対する助言にとっても助けられました。深く感謝しております。

KEKの佐藤伸彦技官には、実験のセットアップをするために足りない工作物の作製を手伝っていただき、実験のサポートを毎回していただきました。また、KEKに滞在している間は様々な面でお世話になりました。深く感謝しております。KEKの小池重明技官には、実験に対する助言に深く感謝しております。

KEKの兵藤一行講師には、PhotonFactoryのマシントイムを配慮していただき、実験中のサポートをしていただき深く感謝しております。

M1の平山さんや脇田さんには、PhotonFactoryの実験の際、実験のサポートをしていただき深く感謝しております。

日頃の疑問や質問にいつも丁寧に答えて下さった岩下先輩に深く感謝いたします。修士論文まで見ていただき、様々な面でお世話になりました。深く感謝しております。また、他のBelle Collaboratorの方々に心から感謝致します。皆様のおかげで、大変充実した研究生生活を送ることができました。

最後に、充実した研究生生活ができるよう支えてくれた石塚さん、貴志さんをはじめとする研究室のメンバーや友人達、家族、私関わった全ての方々に感謝いたします。

付録 A 壁電流

加速器のビームパイプの中に数アンペアのビーム電流流れても、ビームパイプの外で測ると電流が流れているかどうか測定できない。なぜならビームパイプが金属でできており、真空中に流れているビームの電流と全く反対の方向の電流がパイプの壁（金属中）に流れているからである。ビームの電流が直流ならば、電流は金属中を一様な電流密度でながれる。ところがビームは細かく見るとバンチ構造 emacs があり、ビーム電流はたくさんの「パルス」から成り立っている。パルスということは「非常に高い高周波成分が含まれていること」を示す。その高周波が金属に入ると、「表皮効果」によって金属のごく表面にしか電流が流れない。これを壁電流と呼ぶ。この高周波からくる壁電流において、金～ベリリウムに比べて、タンタルは5倍、チタンは20倍の熱がでる。したがって、ベリリウムに金を施し、壁電流も防ぐ。

付録 B HOM エネルギー

HOM とは Higher Order Mode の略で、バンチが通過する事によって生じる高周波である。加速空洞では空洞部分に高周波をためてビームを加速するが、逆に空洞部分にビームがエネルギーを落として、高周波をつくることもある。これは最終的に熱になり、ひどい場合にはビームパイプを損傷させる原因ともなる。また、後続のバンチに変な電磁場を影響させるという恐れもある。

付録 C 光子と物質の反応

光子と物質の主たる相互作用として、1 光電効果、2、コンプトン散乱、3、電子対生成、4、レイリー散乱、5、光核反応がある。このうち、1 から 3 は光子のエネルギー領域に応じてそれぞれが、支配的な相互作用である。つまり、光子エネルギーが 0.1 ~ 0.5 MeV までの領域では 1、光電効果、0.5 ~ 5 MeV までの領域では 2、コンプトン散乱、5 MeV 以上のエネルギーでは 3、電子対生成が主要な相互作用となる。また、レイリー散乱は原子核に強く結合した軌道電子と光子との弾性散乱であり、光子がエネルギーを失うことなしに小角度に散乱される現象をいう。ただ、これはコリメートされた光子を扱うときのみ問題となる。今回使用する X 線は 20 keV 以下であるので、反応としては光電効果となる。次に光電効果について述べる。

付録 C.1 光電効果

光電効果は軌道電子による光子のエネルギー吸収である。これが起こると運動エネルギー $T = E_\gamma - I$ をもって原子外へ放出され、光子は消失する。放出された電子を光電子と呼ぶ。ここで、 E_γ は光子の全エネルギーであり、 $h\nu$ に等しい (h はプランク定数、 ν は光子の振動数)。また、 I は軌道電子の束縛エネルギーである。光電効果は、原子核に最も強く束縛されている電子、すなわち K 核電子でおこりやすく、全体の約 80 % をしめる。 $E_\gamma = h\nu < I_K$ (I_K は K 殻電子の束縛エネルギーの場合には K 殻電子での光電吸収は起こらないので、断面積は急激に減少する。これを K 吸収端とよぶ。同様な現象は L 殻、M 殻、… に対しても起こる。

この光電効果は比較的低エネルギーの低い γ や X 線の重要な相互作用において重要である。また、

この過程は原子番号 Z が大きい物質で顕著となる。広いエネルギー範囲の光子に対する光電吸収の原子断面積 τ を表す近似として次の式がある。

$$\tau = \frac{Z^n}{E_\gamma^{3.5}} \quad (12)$$

ここで、指数 n は光子のエネルギーによって 4~5 の値をとる。この式 12 から見てわかるように、 Z (物質質量) が大きいほど、光電吸収の断面積は大きくなる。断面積が大きくなると反応確率は上がる。したがって、低いエネルギーの X 線をとめるためには、物質質量の大きい金属を届くと影響のあるものの前に置くことは有用である。

付録 D 半導体検出器

付録 D.1 半導体検出器の仕組み

結晶中の物質中では固体中の電子のエネルギー準位は帯状の範囲のみ許される。束縛されている準位を価電子帯、自由に動き回れることのできる順位を伝導帯と呼び、2つの準位間には電子が存在することができない、禁止帯と呼ばれるエネルギーギャップが存在する。励起がない場合、結晶中の電子が価電子帯を満たしており、伝導帯には、電子が存在しない。この状態では電流は流れない。励起がある場合、熱や入射してきた放射線によって電子がエネルギーを受け取り、このエネルギーギャップを超えると、電子が結晶中を自由に動き回れることができるようになり、電流が流れる。つまり、電子が伝導帯に励起すると、価電子帯の電子が存在していた場所には正孔（ホール）と呼ばれる空席の状態になり、その場所へ電子が移動することであたかも正電荷のような振る舞いをする。半導体のエネルギーギャップは、シリコン半導体では約 1.1 eV と小さく、平均電離エネルギーは、3.6 eV である。

半導体には、真性半導体（不純物を含まない半導体）のほかに、p 型半導体（半導体に B、Al、Ga などの価電子の 1 つ少ない原子を添加したもの）、n 型半導体（P、As などの価電子の 1 つ多い電子を添加したもの）がある。これらの半導体の中では添加された不純物がシリコン結晶中にとりこまれ、禁制帯の中に新たなエネルギー準位が生じる結果、P 型では正孔が、n 型では電子が余分な電荷キャリアとなる。この 2 種類の半導体を接合すると、n 型から P 型への電子が、P 型から n 型へ正孔が拡散し、接合部分で両者が打ち消しあって、電荷キャリアのない空乏層と呼ばれる領域が生まれる。電子の拡散は、電子移動によって生まれた電位差と拡散が釣り合うところで平衡状態になる。この時点では空乏層が薄く、放射線を止めるには十分でないが、検出器に逆バイアスを掛け、p 型と n 型のキャリアの結合を促進させ、空乏層を広く、高電場になるようにして用いる。図 82 は p-n 型半導体のバンド構造である。

空乏層に光や放射線が入射すると、光電効果などの電離作用によって、入射エネルギーに比例した数の電子正孔対が生成される。生成された電子正孔対は内部の電場によって両極に移動し、電極から収集された電荷の量によって放射線のエネルギーが求められる。また、逆バイアスで空乏層が広がるため、電子正孔対を収集しやすくなる（図 84）。

付録 D.2 APD 概要

アバランシェ・フォトダイオード (APD) とは、半導体の内部に高い電場勾配を持たせることで電荷増幅機能を備えた半導体検出器である。光や放射線によって生成された電子正孔対は APD 内

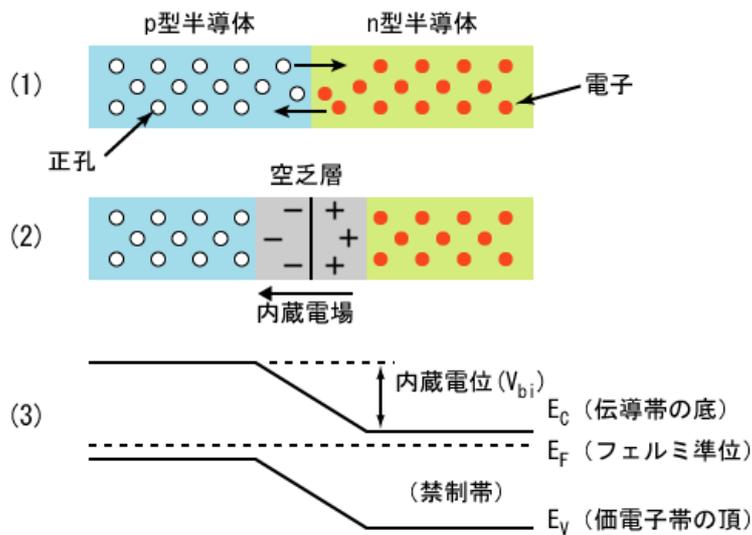


図 82: p-n 型半導体のバンド構造

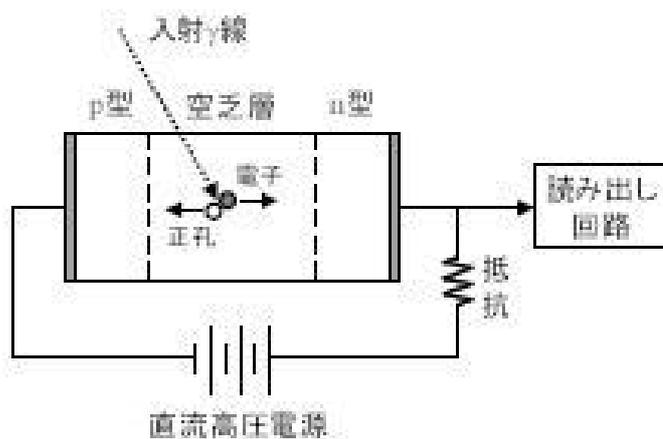


図 83: 半導体検出器の構造

部の電場によって加速され、電極に到達するまでの間に多数のキャリアを伝導帯に叩き上げて信号をなだれ増幅させる。

ただ、APD はアバランシェ増倍過程特有の電波の統計的ゆらぎによる過剰雑音が発生する。このため、ショット雑音は PIN フォトダイオードに比べ大きくなる。PIN フォトダイオードでは、応答速度の制限により付加抵抗を大きくできず、回路系全体の雑音が熱雑音で支配されることがよくあるが、APD ではそれ自身に自己増倍率があるため、ショット雑音が熱雑音と同じ程度になるまで増倍率を上げることができる。そのため、PIN フォトダイオードよりもはるかに優れた S/N 比 (雑音に対する信号の比) が得られる。

また、分感度特性としては、バイアスが掛かっていない状態では、フォトダイオードとかわらな

い。しかし、バイアスが印加されると分光感度が、波長によってはよくなる。

そのほかにも、増倍率の温度特性がある。温度が上昇すると、ある一定のバイアス電圧における増倍率は小さくなる。そのため、一定出力を得ようとする場合は、APDの温度を一定に保つ必要がある。APDは高い増幅率を持つ光電子増倍管(PMT)と、量子効率が高いフォトダイオード(PD)の両方の長所を兼ね備えている。

付録 D.3 種類

APDには、その内部構造の違いからいくつかの種類が存在し、代表的なものとしては斜めエッジ型、リーチスルー型、リバース型の3種類が挙げられる。図84は、それぞれの型での内部構造を表した図である。その中でもここでは特にリーチスルー型とリバース型について取り上げる。

リーチスルー型は狭い増幅領域と広いドリフト領域を持つAPDである。中央に大きな高純度半導体があり、受光面側にp+半導体、その反対側にp型、n型半導体が並んでいる。pn接合部には空乏層が生じて比抵抗が大きくなるが、中央の高純度半導体も比抵抗が大きいため、電圧を印加すると両方に電場が生じる。中央部の比抵抗はpn接合部ほど高くないため、なだれ増幅を起こすほどには高電場にならないため、この部分は生じた電荷を高速で移動させるドリフト領域になり、増幅は全てドリフト領域の後ろにある狭いpn接合部で行われる。ドリフト領域を広くすることでX線を検出できる厚さを持たせることができる。したがって、リーチスルー型APDはX線検出器として多くつかわれる。

リバース型APDは、リーチスルー型APDの増幅領域を受光面側に移動させ、シンチレーション光の検出に特化させたAPDであり、増幅領域は表面から~数 μm 程度のところにある。シンチレーション光は通常表面から1~3 μm で電子正孔対に変換されるので、ほぼ全ての光が完全に増幅されることになる。増幅領域を表面側にするメリットは、ドリフト領域で発生する熱励起電子を増幅せずに済むことにある。正孔は電子に比べて増幅されにくいいため、暗電流が他のAPDに比べて低く押さえることができる(5mm角、20度で0.7nA程度)。また空乏層の厚さが約40 μm と薄く、300V程度の低電圧で十分な増幅率を得る事が出来る。

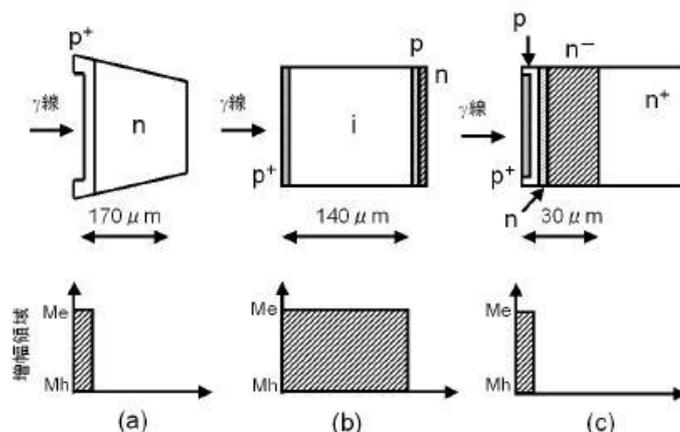


図 84: APD の 3 つの異なる内部構造図。(a) 斜めエッジ型 (b) リーチスルー型 (c) リバース型

参考文献

- [1] B. Aubert et al. (BaBar Collab), Phys. Rev. Lett. 89, 201802 (2002).
- [2] K. Abe et al. (Belle Collab), Phys. Rev. D 66, 071102 (2002).
- [3] S. K. Choi, S. L. Olsen et al. (Belle Collab), Phys. Rev. Lett 91, 262001 (2003)
- [4] G. Gokhroo, G. Majumder et al. (Belle Collab), Phys. Rev. Lett 97, 162002 (2006)
- [5] Belle II Technical Design Report, KEK Report 2010-1, arXiv: 1011.0352 (2010)
- [6] P. Raimondi, 2nd SuperB Workshop, Frascati, Italy (2006)
- [7] S. Rummel, L. Andricek, Nucl. Instr. Meth., A 466, 359 (2001)
- [8] 飯島徹, 中山浩幸, 後田裕. 高エネルギーニュース BelleII 実験 29-4 (2011)
- [9] 飯田直子. 高エネルギーニュース SuperKEKB 計画進捗状況 29-1, 20 (2010)
- [10] 池田仁美. OHO2004 加速器セミナー 放射光とビーム計測 (2004)
- [11] 船越義裕. OHO2011 加速器セミナー SuperKEKB のマシンパラメータ~ナノビーム方式と低エミッタンス (2011)
- [12] 宇野彰司. 高エネルギーニュース Belle 運転 30-3 (2011)
- [13] K. Kanazawa. BelleII Focused Review 11 November 2011 IR Beam Pipe (2011)
- [14] 浪岡武, 山下広順. 「X線結像光学」, 培風館 (1999)
- [15] 岩住俊明. OHO1993 加速器セミナー X線ビームライン (1993)
- [16] 鈴木久則. 1993年度名古屋大学宇宙物理学研究室修士論文 X線天文衛星 ASTRO-D 搭載用多重薄板型 X線望遠鏡の X線光学特性の研究 (1993)
- [17] 物理学辞典 (三訂版) 培風館 (2005)