

# Belle II 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

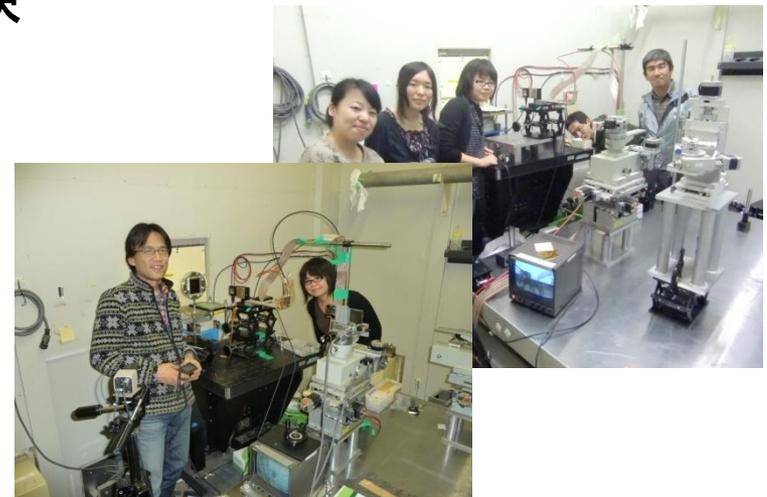
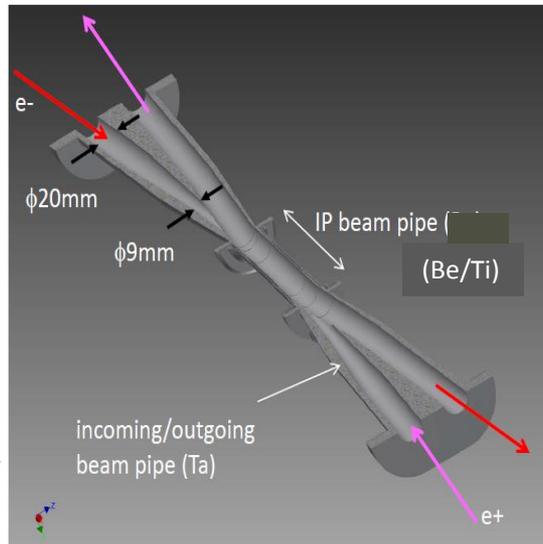
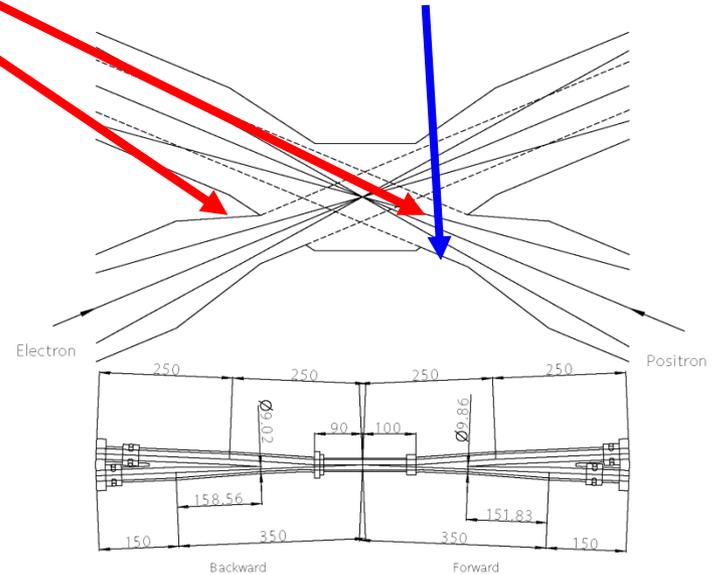
奈良女子大学理, KEK素核研<sup>A</sup>, KEK加速器<sup>B</sup>, KEK共通基盤<sup>C</sup>, KEK物構研<sup>D</sup>  
村上潤, 田中秀治<sup>A</sup>, 中山浩幸<sup>A</sup>, 坪山透<sup>A</sup>, 後田裕<sup>A</sup>, 原康二<sup>A</sup>  
金澤健一<sup>B</sup>, 高力孝<sup>A</sup>, 佐藤伸彦<sup>C</sup>, 小池重明<sup>C</sup>, 兵藤一行<sup>D</sup>  
平山明子, 宮林謙吉, 脇田紗弥佳

# 目次

- ▶ はじめに
- ▶ シンクロトン放射とその対策
- ▶ Ridge構造について
- ▶ 実験のセットアップ
- ▶ 全反射の条件時の実験
- ▶ Tip-scatteringの条件時の実験
- ▶ まとめ

Tip scattering  
(unknown)

Ridge  
Structure design



## はじめに

---

**2014年度からSuperKEKBの運転が始まる。**

SuperKEKBの衝突点では、衝突点近くの収束磁石で発生した放射光がピクセル検出器に当たらないようにしたい。

そのために

**(1) タンタルビームパイプ内部のridge構造**

**(2) 金メッキ**

を採用する。

ridge先端での散乱や、この場所の全反射などが問題になるかもしれない。

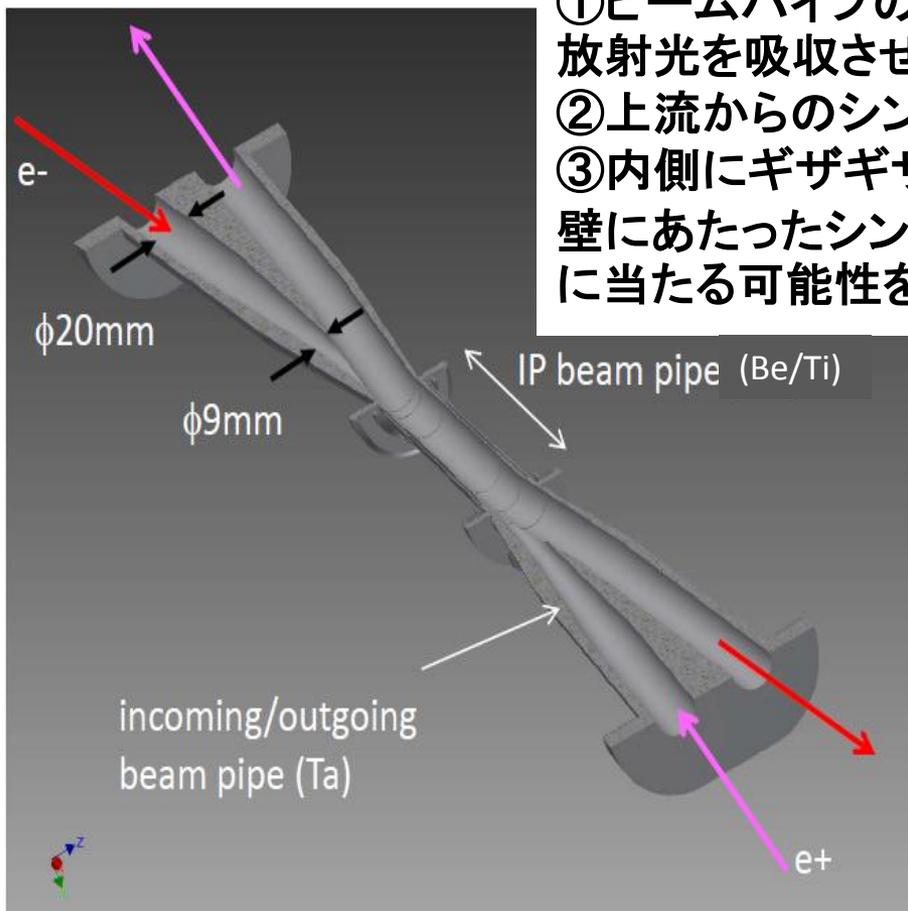
この反射は材料の表面状態によるので、シミュレーションだけでは予測が難しい。

→シミュレーションで使うための実測データが重要となる

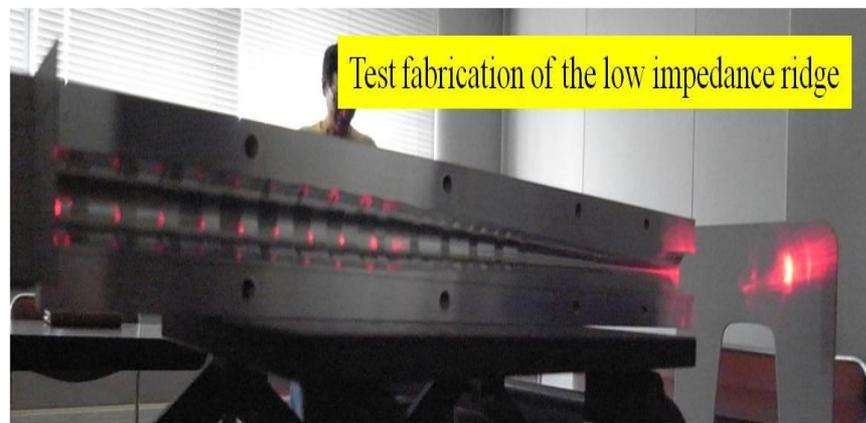
⇒2011年冬に、KEKのPhoton Factoryで行った。

# シンクロトロン放射(5-20 keV)を止めるための対策

- ①ビームパイプの材質には重い物質であるタンタルを採用し、放射光を吸収させるため金メッキ100  $\mu\text{m}$ を内壁に施す
- ②上流からのシンクロトロンを止めるため入口の径を絞る
- ③内側にギザギザのridge構造を作ることによって、ビームパイプ内壁にあたったシンクロトロン光が反射散乱されてビーム直線部に当たる可能性を減らす



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

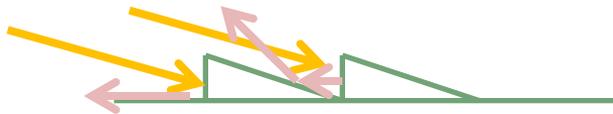


# Ridge構造について

Ridge構造なし

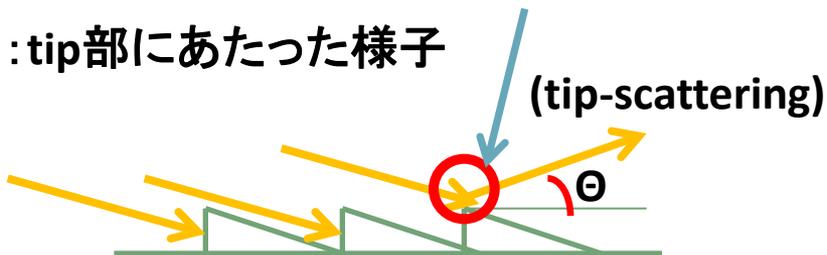


Ridge構造で放射光をとめる



しかし

例外: tip部にあたった様子



散乱面が滑らかな時は、入射角度が  $0.5^\circ$  以下のX線(10keV程度)は全反射することがある

→ 前方散乱の可能性

⇒①試験片の平面部に10 keVのX線を小角度で照射し、全反射の有無を測定する

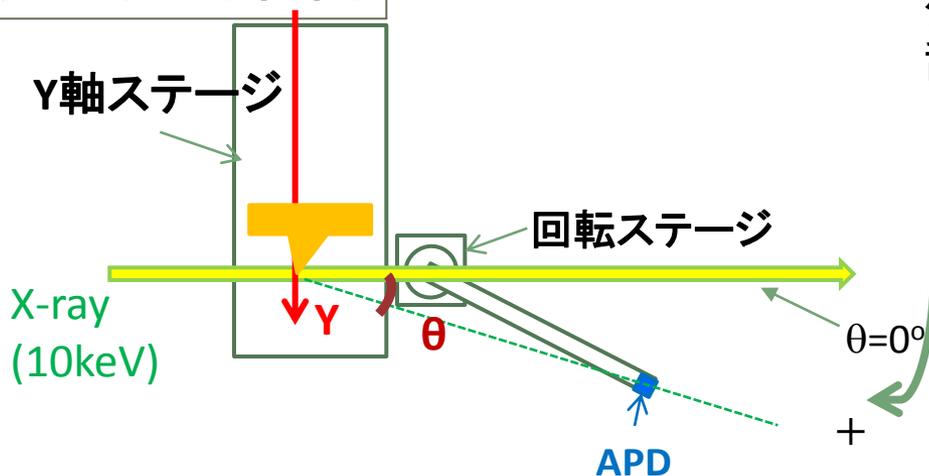
放射光(5-20keV)がridgeに当たると、前方散乱は構造的にほぼ防げる

放射光がridgeのtip部に当たった時だけは、予測が難しい

⇒②試験片のtip部に5-20 keVのX線を照射し、散乱の様子を測定する。

# セットアップ

## セットアップ平面図



タンタル試験片にX線ビームを当て、散乱の角度分布を検出器(APD)で測定する。

### 座標軸の定義

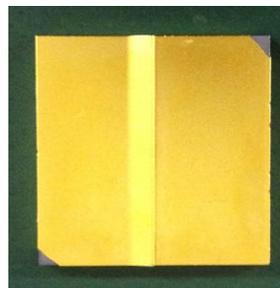
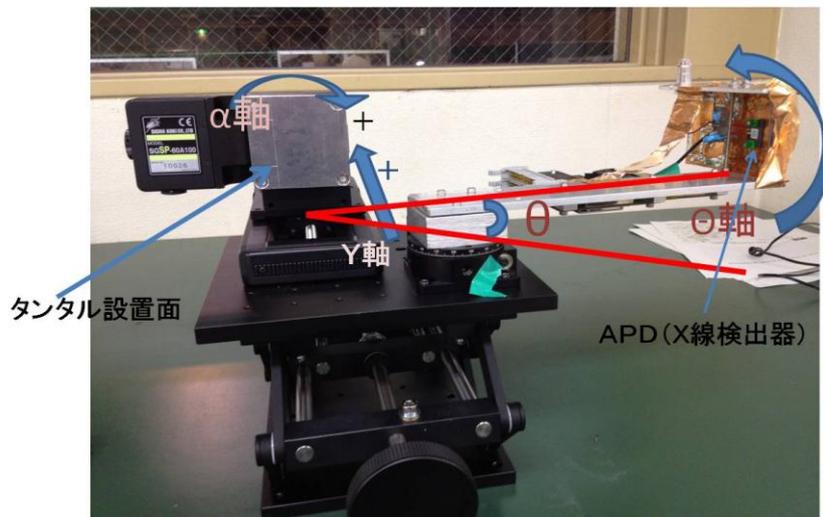
1. タンタル試験片の水平移動方向; Y
2. X線の散乱角;  $\theta$

検出器の大きさ  $5 \times 5 \text{ mm}^2$

### ビーム幅;

水平方向; 0.08 cm

鉛直方向; 0.2 cm

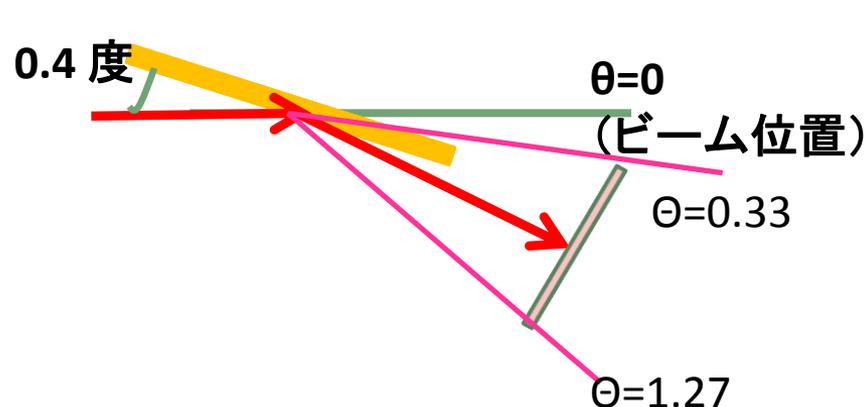


### タンタル試験片

厚さ3 mm、30 mm 四方  
高さ1mm のRidge 構造  
放射光を当てる面に  
厚み100  $\mu\text{m}$  の金メッキ

## 1、タンタル試験片平面部にX線を照射する

- ▶ 平面部にあてることで、tipのない形での散乱の様子を知る。
- ▶ 平面部での入射により、全反射が起こる可能性があるなのでその有無を確かめる



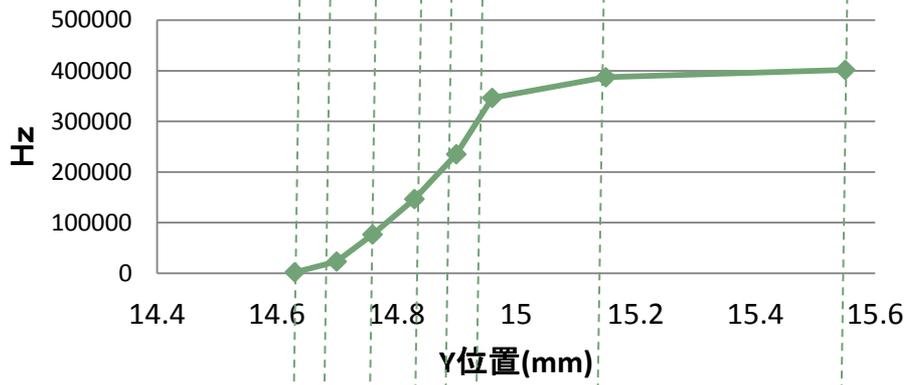
タンタル試験片へX線を入射角度0.4度で照射した場合、全反射が起きるとすると、反射光の方向が $\theta=0.8$ 度となる。また、入射角0.4度の時の金の反射率は入射粒子の半分であるといわれている。

今回センサーサイズは5mm角であるので0.33度付近から1.27度付近まで幅のを持ったピークを持ち、入射粒子の半分の粒子が検出されると予想される。

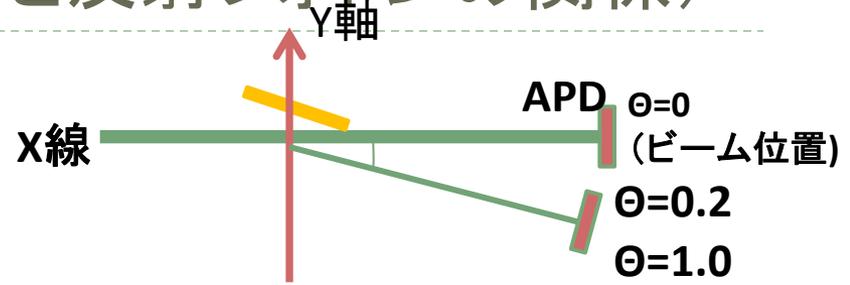
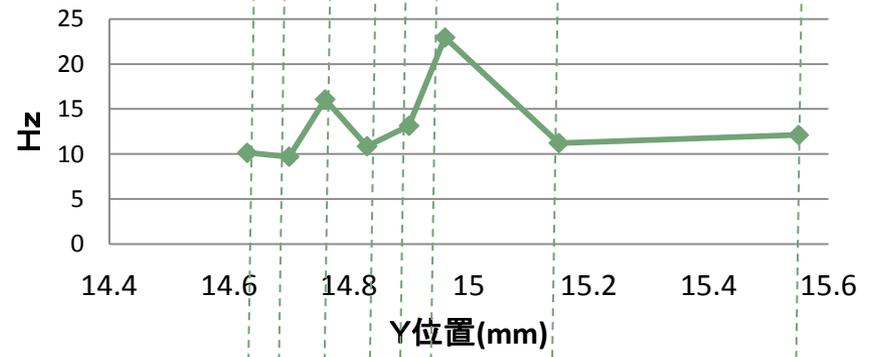
①平面部へX線の入射  
Photon Factoryでの測定

結果 ( $\theta=0.6$ 度での入射光子と反射光子の関係)

$\theta=0$ (ビーム位置)の時のカウントレート



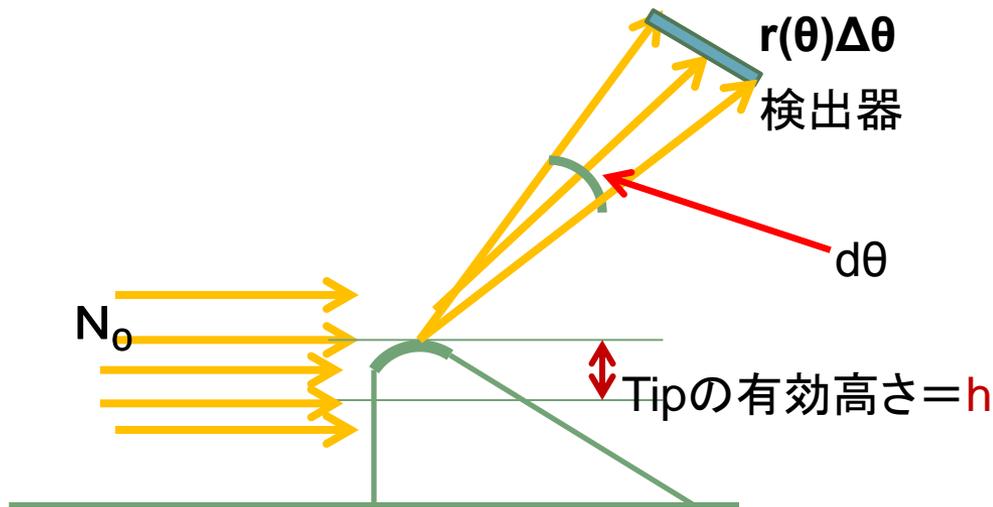
$\theta=0.6$ 度でのカウントレート



入射光子;  $3.8 \times 10^5$  Hz  
 反射光子; 最大23 Hz  
 統計誤差のばらつきより反射光子カウント数のばらつきが大きく、最大で+/-100%程度ばらついている。  
 ⇒最大反射カウント数/入射カウント数を反射率とする。

反射率 ;  $6.0 \times 10^{-5}$   
 →反射光子数は、入射光子の半分より十分小さい  
 また、反射率は、大きく見積もって5ケタ落ちと有意に小さい。  
 ⇒全反射はない

## 2,tip部へX線を照射する



$n_0$ : 入射粒子密度 [Hz/cm<sup>2</sup>]  
 $W$ : 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

Tipに当たる数;  $N_0 = n_0 \times W \times h$ .....①

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

反射photon =  $N_0 r(\theta) \Delta\theta$ .....②

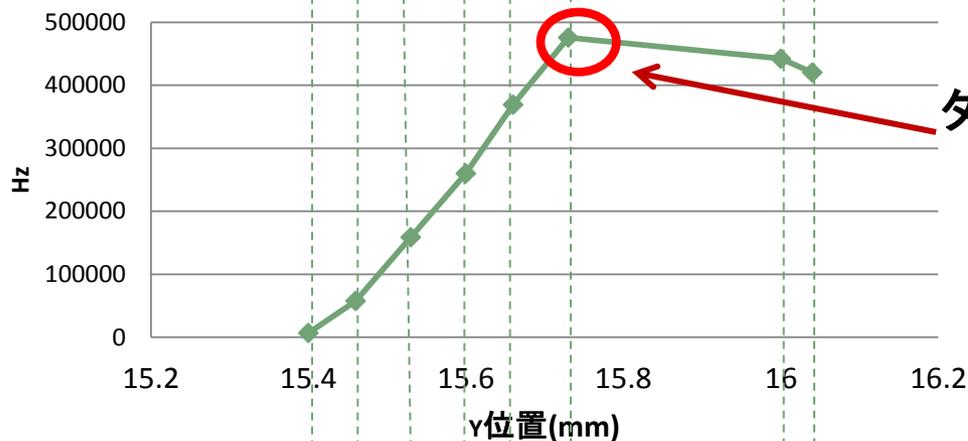
①、②より “反応断面長”を  
 $r(\theta)h$ と定義したとき

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

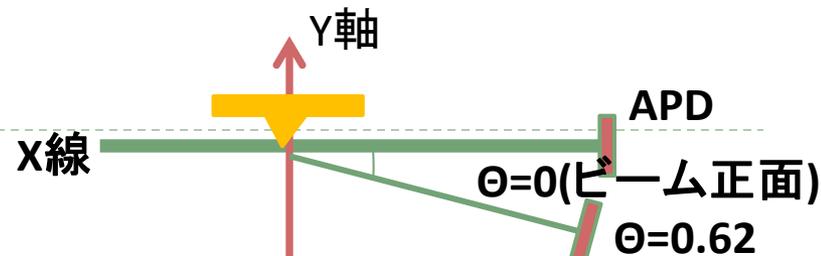
## ②tip部へX線の照射

# 結果

### $\theta=0$ 度でのカウントレート

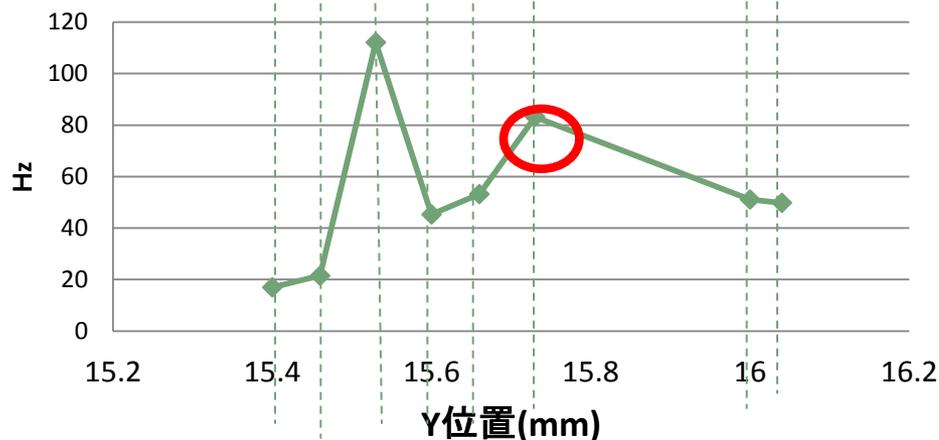


タンタルにX線が当たり始める



統計誤差のばらつきより反射フォトン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  
 $\Rightarrow$  反射photon=最大反射カウント数

### $\theta=0.62$ 度(ビーム位置と外れた点)でのカウントレート



測定結果から  
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  
 $4.0 \times 10^{-5}$  cm/degree

# まとめ、今後の課題

- ▶ PF で実験を行い、平面部にX線を照射することで、全反射の有無を確かめた。また、平行X線がtip部に当たることによるtip-scattering の前方散乱の寄与を測定した。

- ▶ **全反射の条件での測定**

平面部にX線の照射した時、反射率は $4.0 \times 10^{-6}$ であり、全反射の傾向は見られなかった。全反射が起きる最適な金メッキ厚は50nmである。今回の金メッキ厚は100  $\mu\text{m}$ であり、最適な厚さより十分大きかったため全反射が起こらなかったと考えられる。

- ▶ **Tip-scatteringの条件時の実験**

tip 部前方0.2-1.1 度の範囲では、最大

反応断面長  $4.0 \times 10^{-5}$  [cm/degree]

- ▶ **今後の課題**

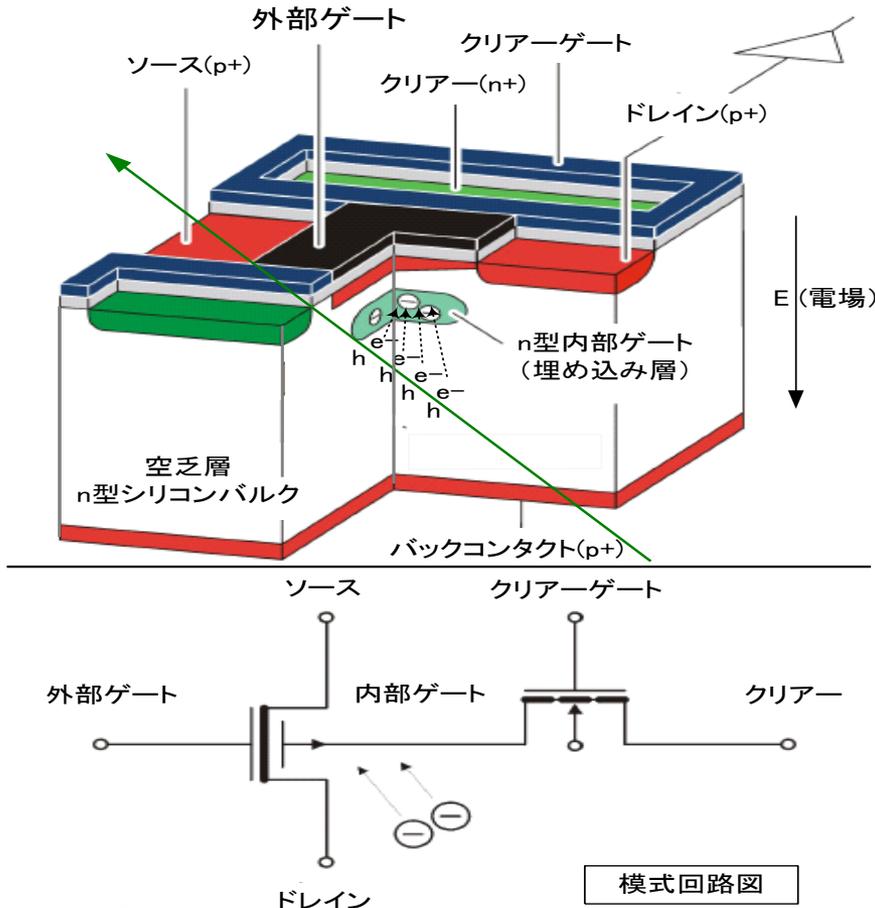
SR生成およびビームパイプのGEANT4を用いたシミュレーションの評価はすでに行われている。そこで今回実験で評価した反射の影響をモデルに入れ、改めて検出器への影響を確認する。

Back up



# ピクセル型検出器(PXD)

## Depleted p-channel FET ピクセル検出器



- Bファクトリーのエネルギーに耐えることのできるピクセル型検出器にDEPFETを使用する。

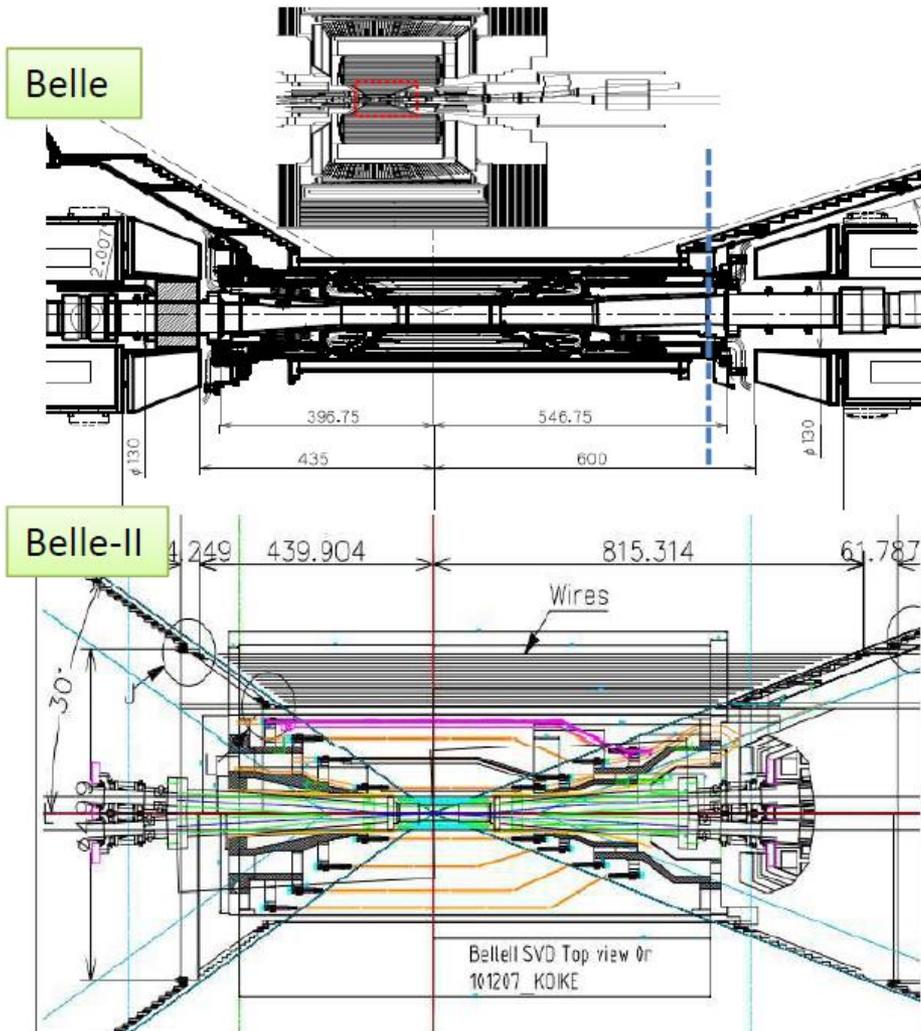
- ピクセル検出器は電化製品でもよく使われるFET(電界効果型トランジスタ)を応用した検出器

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。

# 衝突点付近の設計

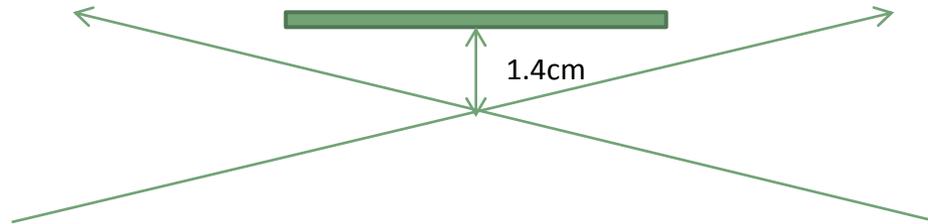


衝突点付近の設計は大きく変わる。

- ①ビームパイプ内径小さくなる  
(内半径15mm→10mm)
- ②ビーム交差角が大きくなる  
(22 mrad → 83 mrad)
- ③衝突点近くで2股に分かれる
- ④PXDを新たに配置  
(交差角を大きくしビームパイプの内径を小さくしたので配置することを可能になった。)

# 金で吸収された2次電子の影響

---

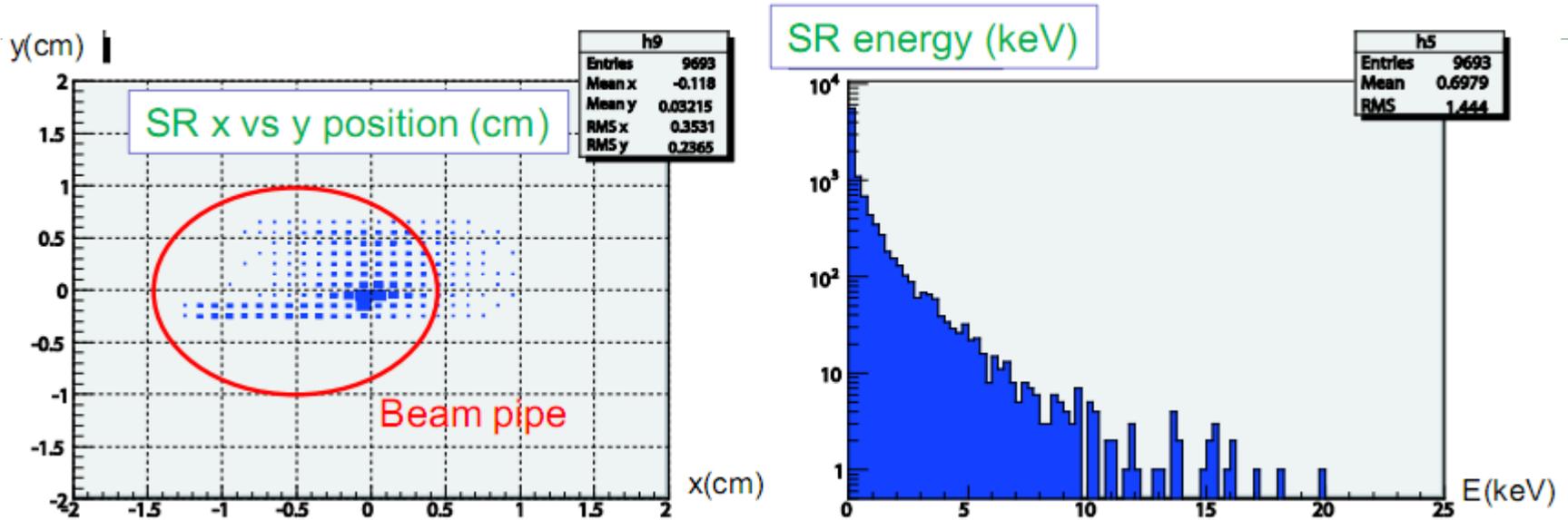


- ▶  $P[\text{GeV}] = 0.3B[\text{T}]R[\text{m}]$  (R: 回転半径)
- ▶ PXDの位置は衝突点から14mm=0.014m
- ▶ Belleの磁場  $B=1.5[\text{T}]$

からPXDにヒットできる荷電粒子は $0.3 \times 1.5 \times 0.014 = 6.3\text{MeV}$ 以上のビームに対して垂直方向の運動量 $P_t$ がある粒子である。

パイプの内部の金メッキで生成された2次電子の場合 $0.3 \times 1.5 \times 0.004$  (PXDの位置-金メッキの位置) =  $1.8\text{MeV}$ であるため今回問題としている $20\text{keV}$ 以下のx線が金で吸収されたときに生成される2次電子によるPXDへのヒットは無視できる。

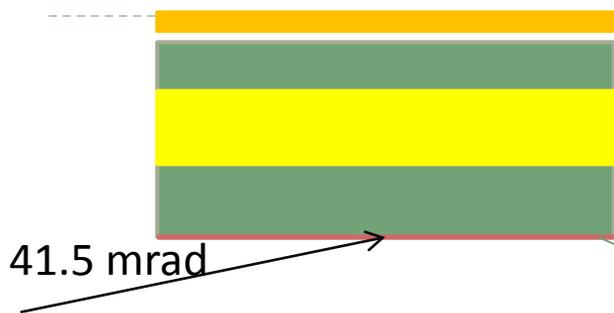
# SR simulation よりPXDで問題となるエネルギー



- **5 keV以上のSRの影響が無視できない状況**
- PXDは1フレーム読み出すのに20 usかかる
  - 約5000バンチ交差分の情報が重なって測定される
- 1 keV, 5 keV 10 keV, 20 keVのphotonをIPに内部より当ててIPの外に出てくる粒子数の比率とエネルギー分布をGeant4で調べてみた。

# Setup と結果

# Beに金メッキを行った時の反応



Au plate(optional)  
 0.4 mm Be  
 1.0 mm PF200  
 0.6 mm Be  
 10 um Au

各:10万イベント

	Default	5 um 金メッキ	90° 入射 (reference)
1 keV	100(96.2)	(96.3)	99.7
5 keV	100(96.8)	(97.8)	99.6
10 keV	100(96.4)	(96.4)	96.3
20 keV	100(98.0)	(97.8)	80.2

IP物質でのBGの阻止率

99%以上エネルギー吸収した比率

▶ 17 反応した放射線の角度分布をみていないので100%というのはまだあやしい

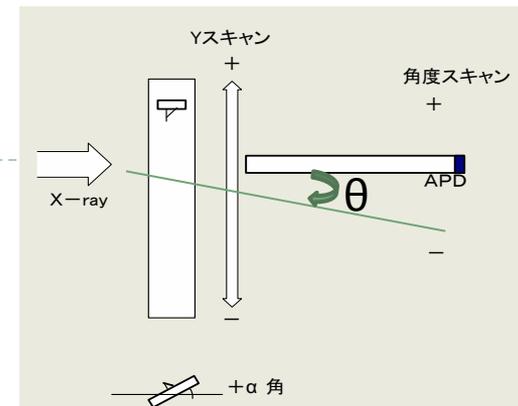
# アライメントメントの調整方法①

## ▶ 角度( $\theta$ )スキャン

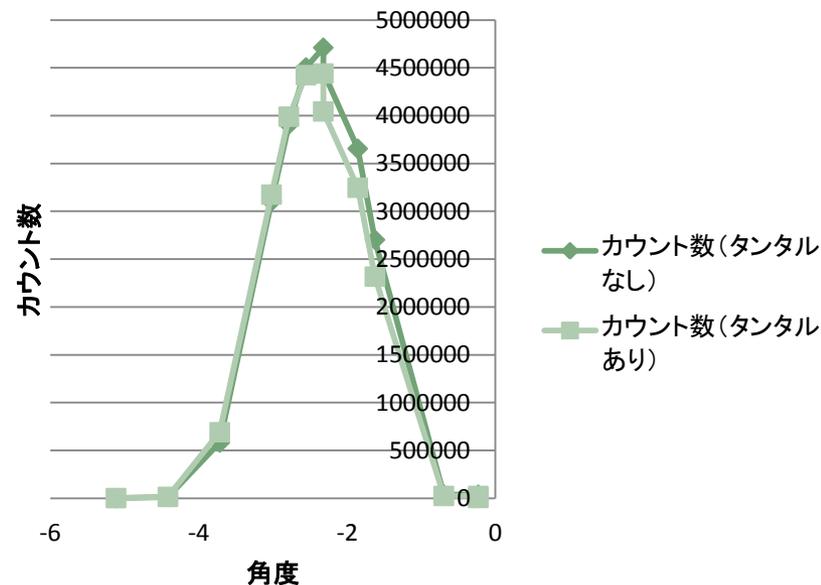
タンタルなしでAPDが一番なるところをみる

左図からX-rayに何も当たってない時の  
の $\theta$ の基準点は $\theta = -2.32$ 度

ここで、タンタルのYスキャンを一番奥に  
置いたときに、x-rayがタンタルに当たらないか  
をみると、当たらないので  
このまま試験をつづける



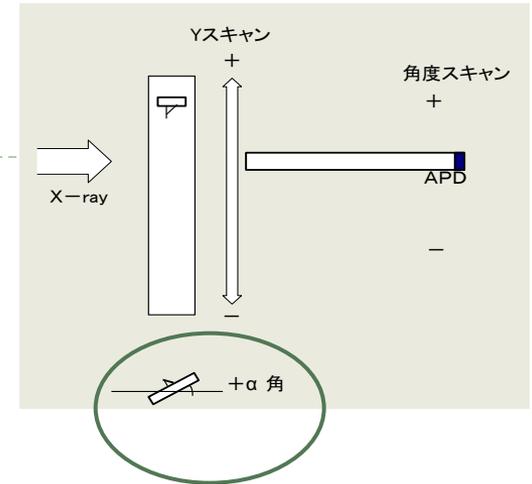
## Yを一番奥に持ってきたときの タンタルなしとアリの比較



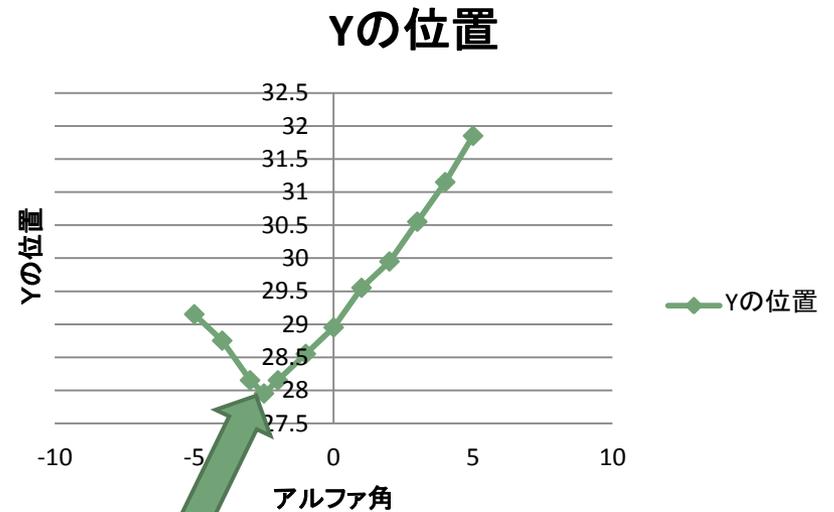
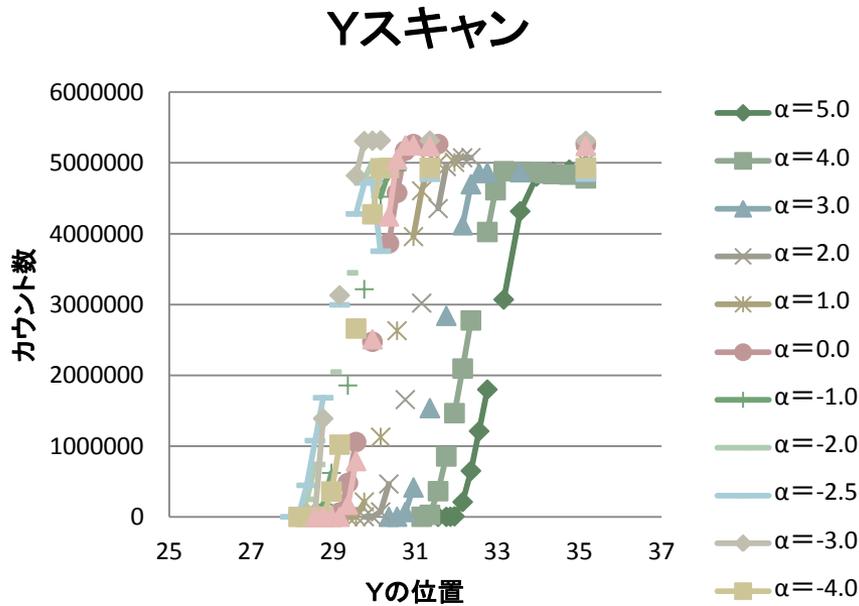
# アライメント調整方法②

## ▶ $\alpha$ スキャン

ビームがステージに平行にあたっている $\alpha$ 角をさがす



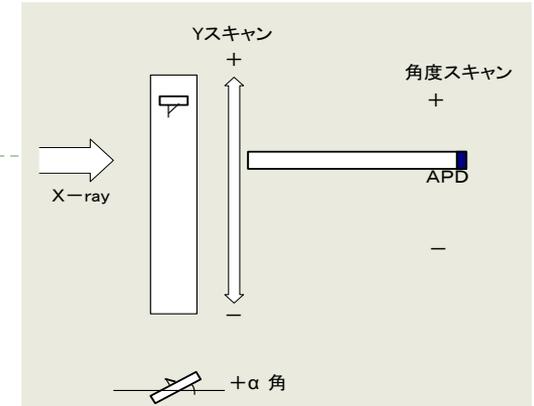
上がり始めからプラトーになるまでの位置の  
中点を $\alpha$ 角でくらべる



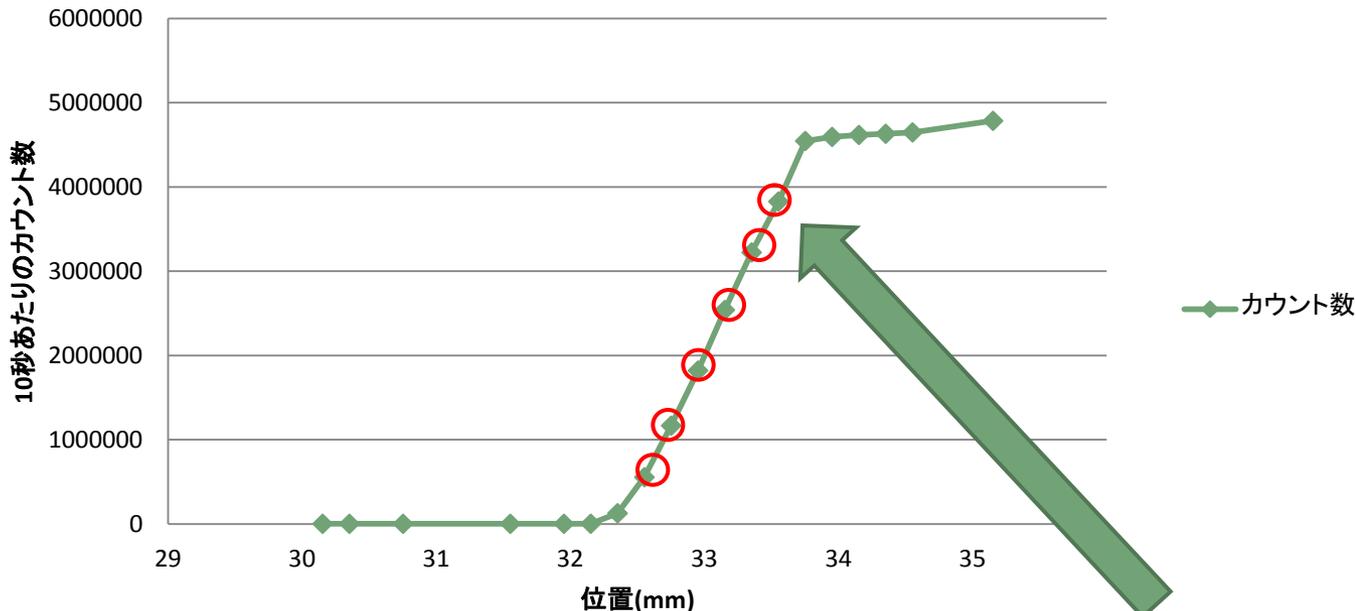
$\alpha = -2.5$ 度に決定

# アライメントメントの調整方法③

- ▶ タンタルが当たり始めたところを探すためのYスキャン



## タンタルありでのYスキャン



あたり始めでギザっとしている部分の効果は見れない

## 本当はどれぐらいの範囲測定

---

- ▶ 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リッジに当たって止まる。
- ▶ 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。
- ▶ 角度変化が1.64-1.96度の場合は、直線部(Ti)に当たる。
- ▶ 角度変化が1.96度以上の場合は、直線部(Be)に当たる。

# Photon factory

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

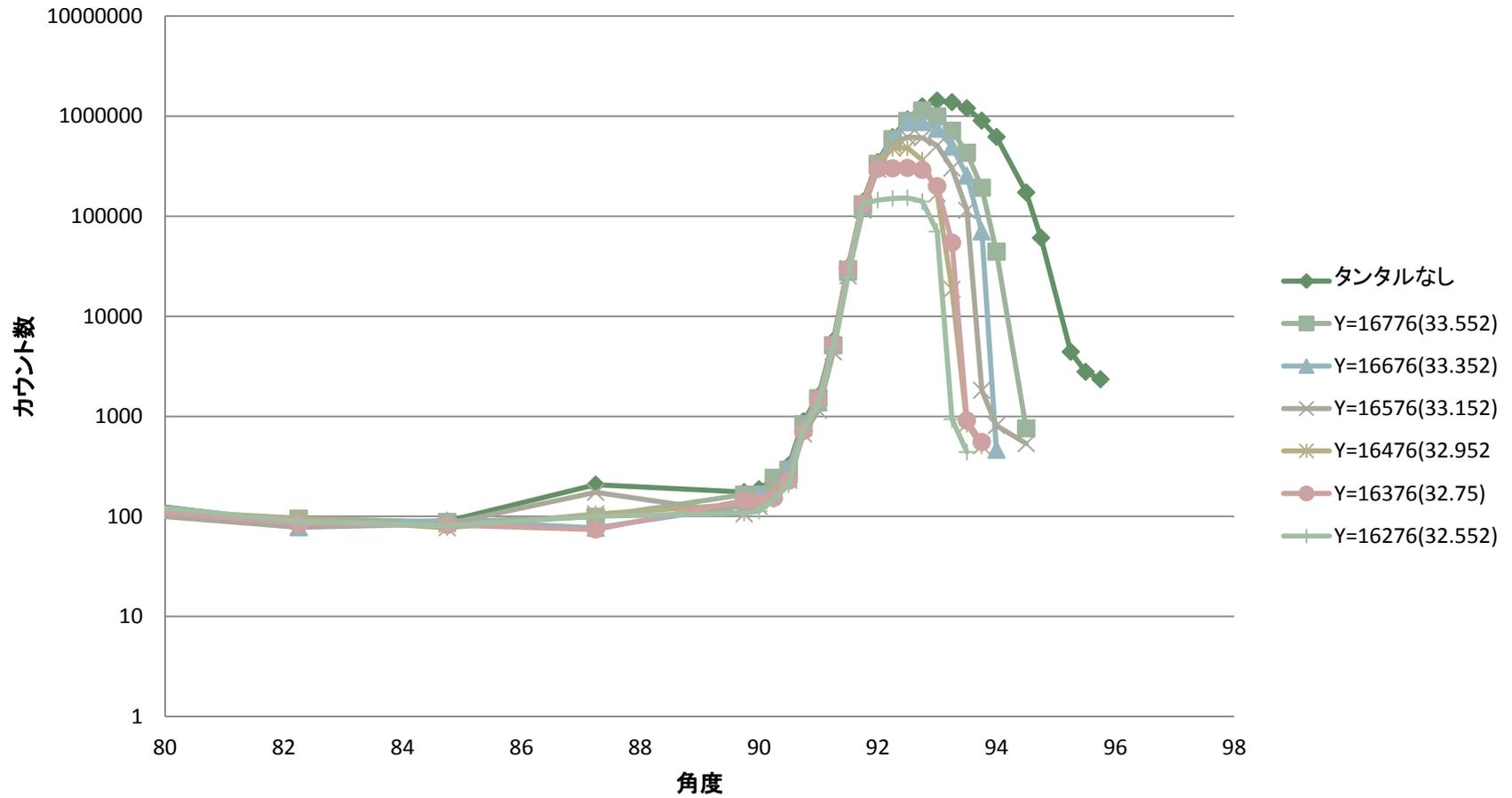
## 仕様

- ▶ 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/mm/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。

# X線発生装置

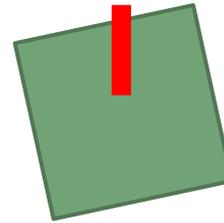
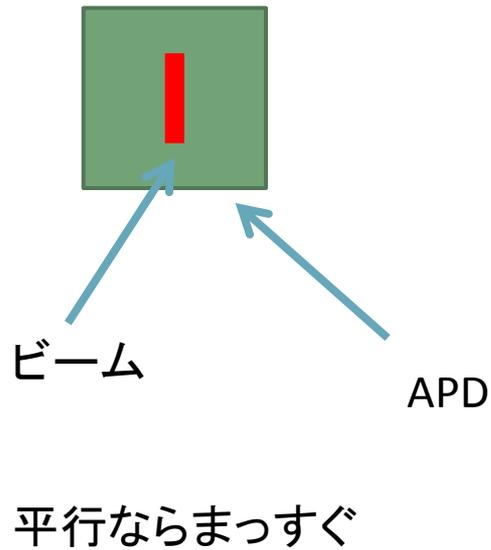
## 角度分布





# なぜまっすぐでないか

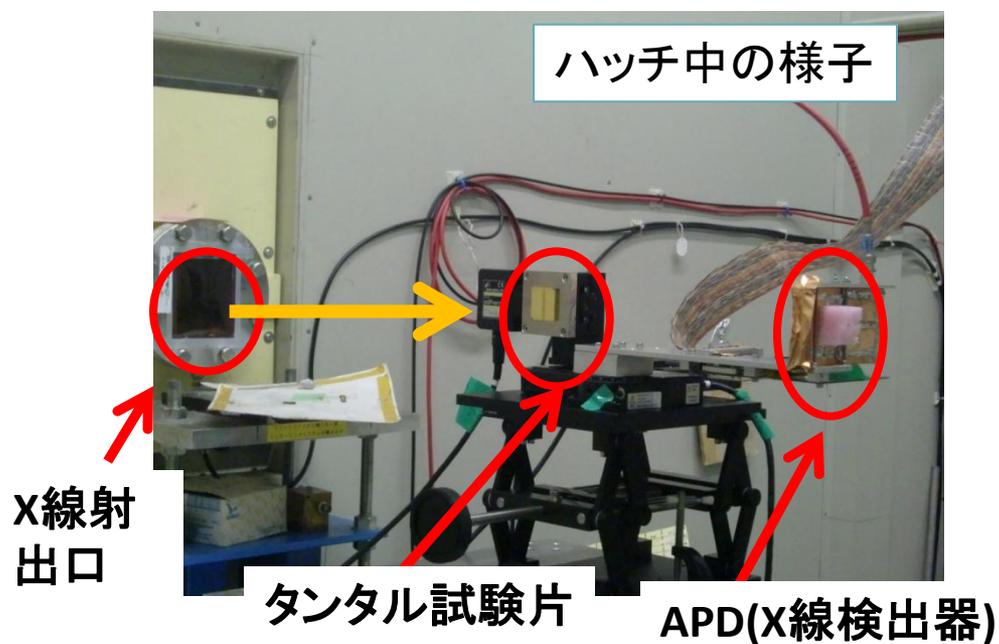
---



APDが少し傾いてたら、それが、グラフに見えるはず

# Photon Factory

## ▶ セットアップ様子

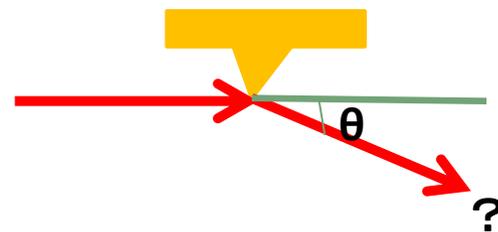


# Photon Factoryでの実験

今回の実験では、10 keVのX線を用い、平行ビームを出すKEKにあるPhoton Factoryを用いる。

## ① タンタルtip部にX線を照射する

ビームパイプの”ridge 構造”のtip部を模したタンタル試験片のtip部分にX線を照射した時に、どのようなふるまいをX線が行うか調べる

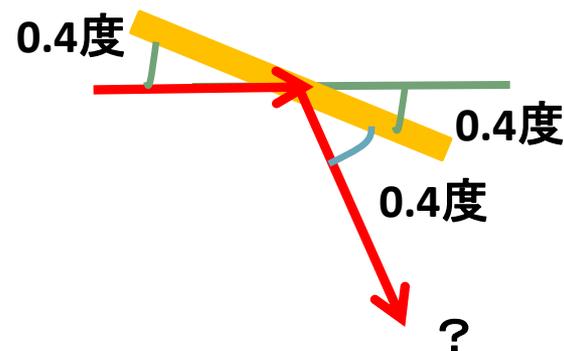


## ② タンタル試験片平面部にX線を照射する

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

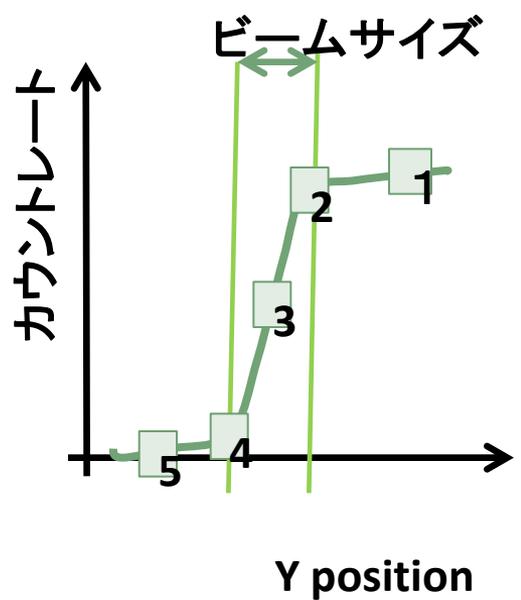
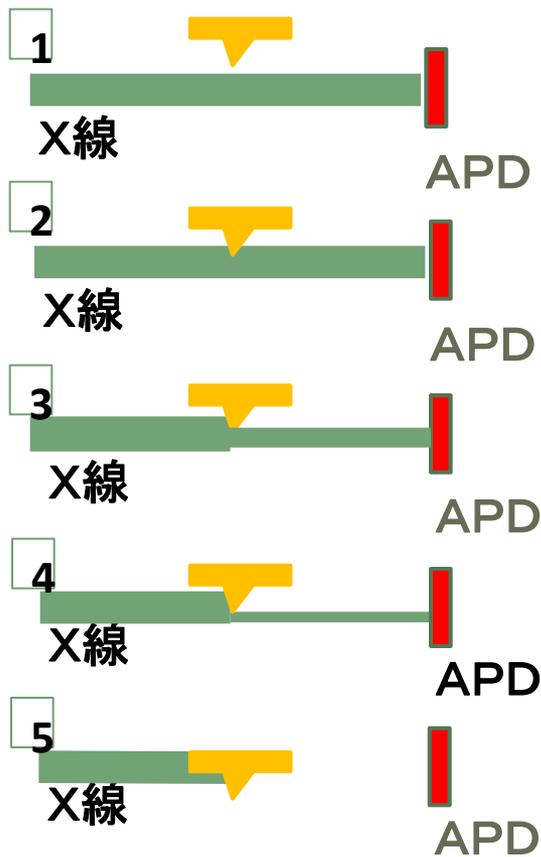
全反射の性質が今回のタンタル試験片にあればRidge 構造があっても、当たり所によってはバックグラウンドを増大させてしまう危険性がある

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

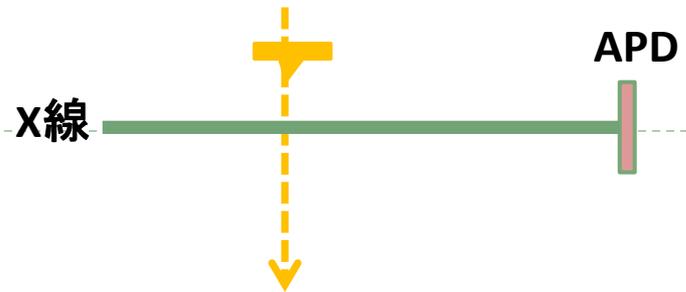


# ①タンタルtip部にX線を照射する

## 試験片の照射位置の決定



Y軸を動かす



タンタル試験片にX線が照射されるほど、カウントレートが下がる

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 = ビームサイズ

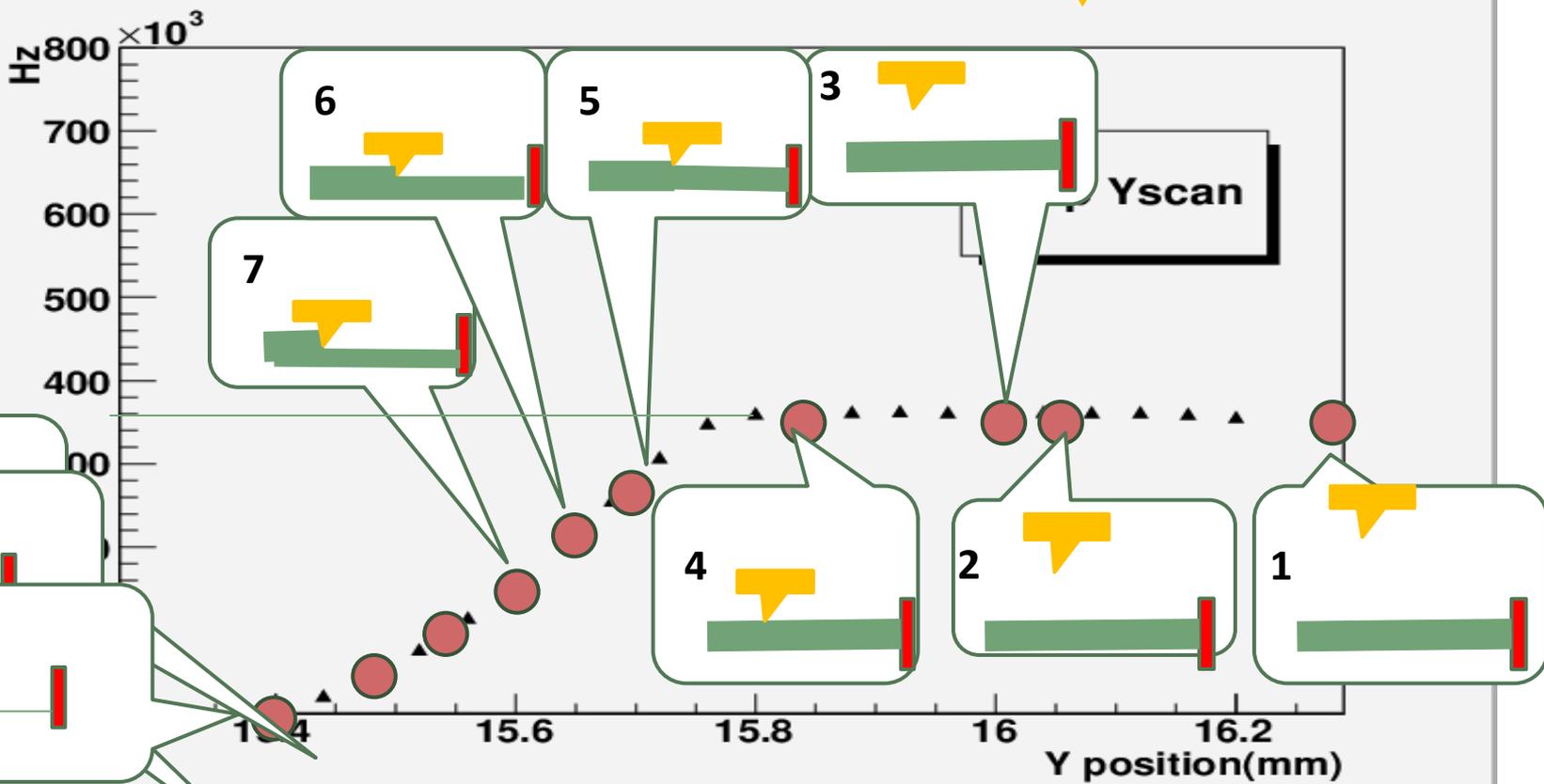
X線がtip部にあたり、散乱するしたら、ビームサイズの幅は、X線のビーム幅より大きくなるはずである。またここからどこのY(1-5の各)の位置で角度分布をとるかを決定する

特に4周辺の角度分布が重要！！

tip ありのタンタル片にX線を照射したときに APDを固定しタンタル片を動かしたときの様子

①タンタルtip部にX線を照射する

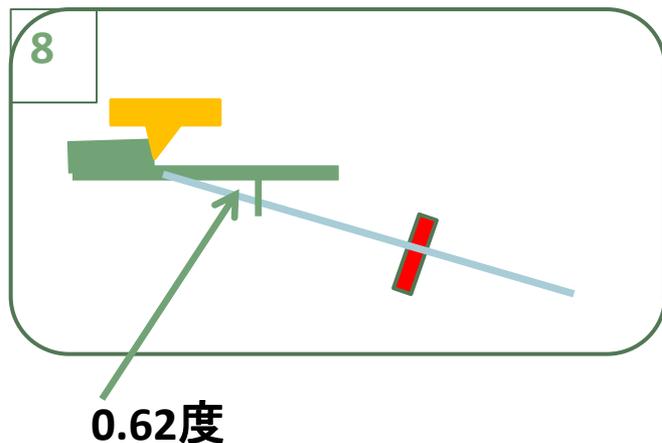
# 照射位置の決定の測定結果



立下りから立ち上がりまでのY位置の差=ビームサイズ  
→ビームサイズ= 0.38 mm (tip 部にあたっての反応)  
実際のビームサイズは0.88 mm (蛍光板)

① タンタルtip部にX線を照射する

# 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



- ▶ APD位置がビーム位置から外れている+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。

8の位置必ずタンタルにX線が照射している

バックグラウンドである値を引くと  
1秒当たり34カウントの反射がある。

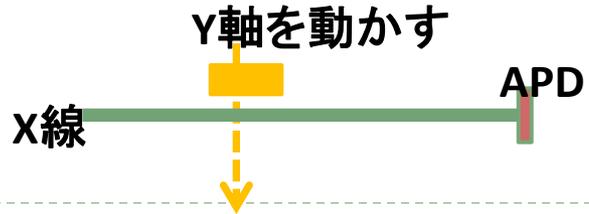
入射photon =  $4.00 \times 10^5$  photons

反射photon = 34 photons

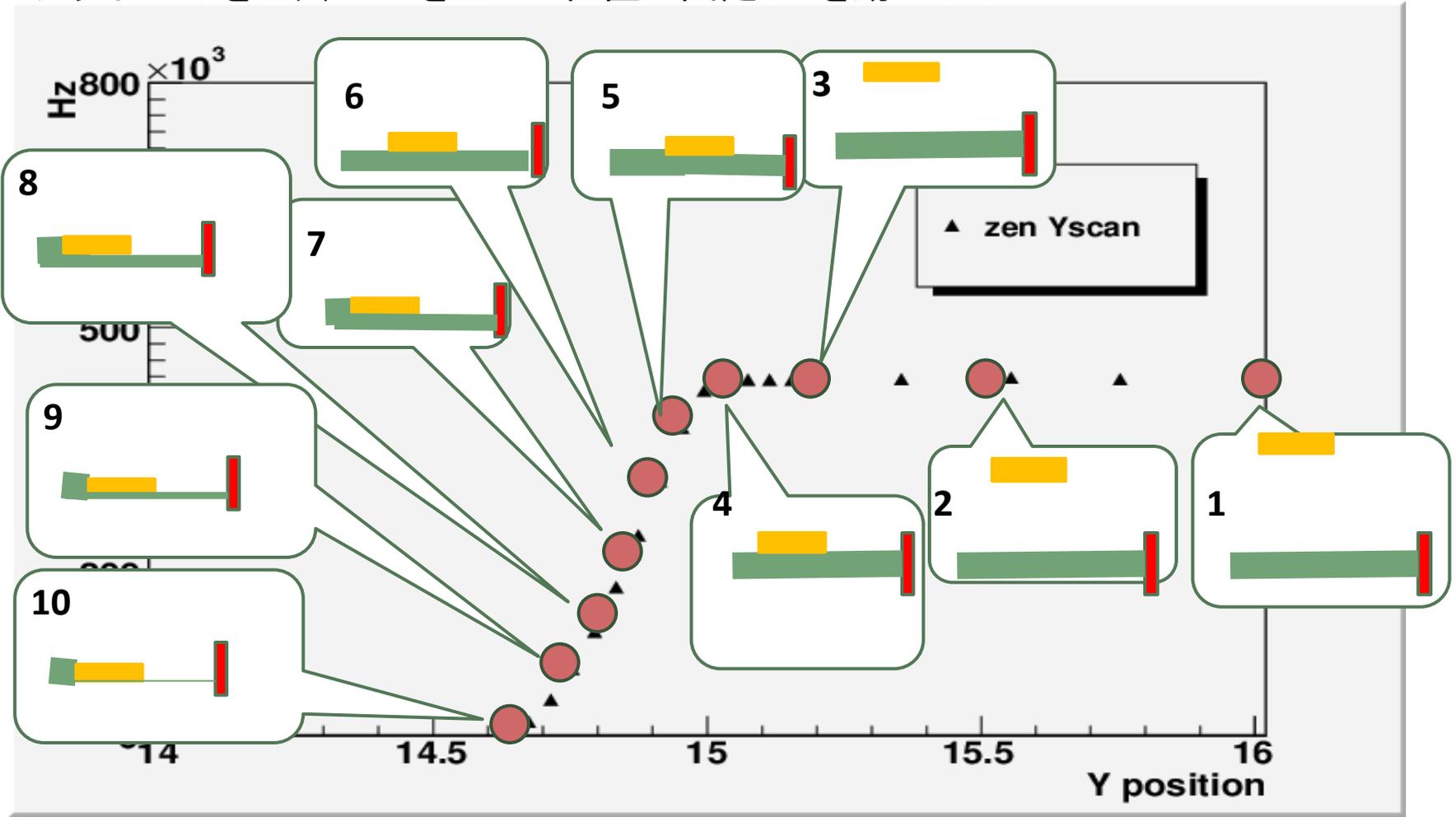
APDの幅(5 mm)を考慮すると、  
前方0.2度から+1.1度の範囲内には、強いtip-scattering やtipに当たることによる乱反射は空気中の場合で、  
入射粒子の $8.5 \times 10^{-4}$ 存在する。

②タンタル試験片平面部にX線を照射する

# 全反射の条件での結果



アライメントをとり、APD をビーム位置に固定しY を動かした



②タンタル試験片平面部にX線を照射する

## 全反射についての考察

---

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

→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。

測定範囲；- 0.6度から+ 0.7度。

→予想；0.7度付近ではカウントレートは約 $2 \times 10^5$  Hz

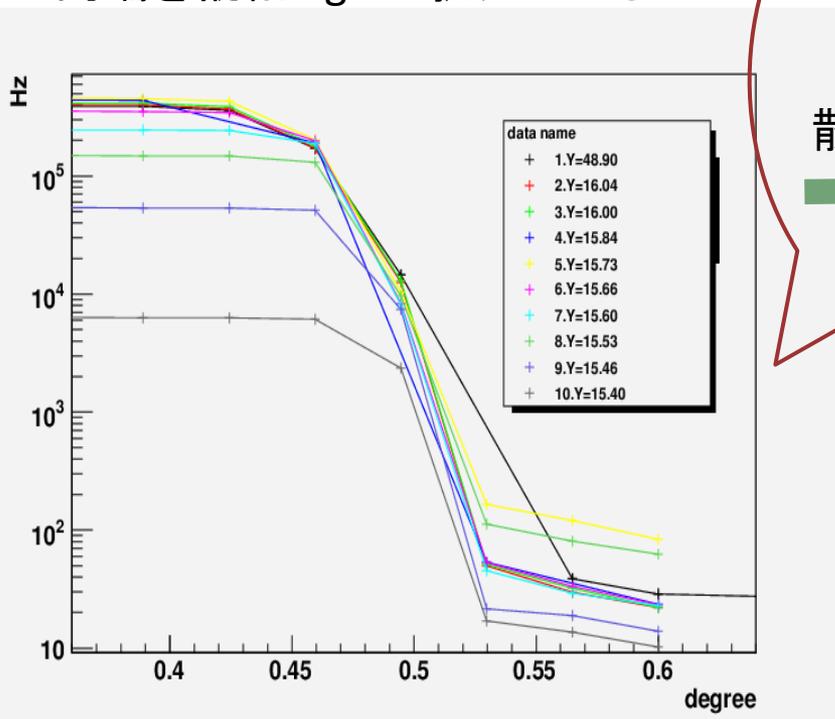
→測定結果；どのY位置においても10-20 Hz

0.4度では、全反射の傾向は見えない。

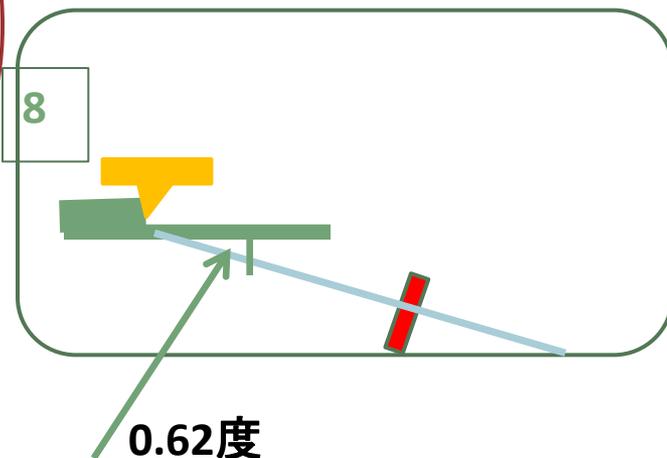
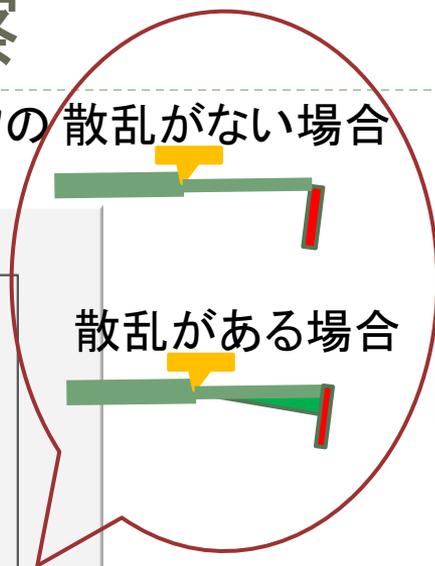
# ①タンタルtip部にX線を照射する

## tip-scatteringの考察

tip時にX線を照射したときのグラフの散乱がない場合  
両端を縦軸logにし拡大したもの



散乱の様子を示す右図では  
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  
→0.1度以上の反射はない



APD 位置がビーム位置から外れている  
+ 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。

8 の位置必ずタンタルにX線が照射している  
バックグラウンドである値を引くと  
1 秒当たり34 カウントの反射がある。  
入射photon =  $4.00 \times 10^5$  photons  
反射photon = 34 photons

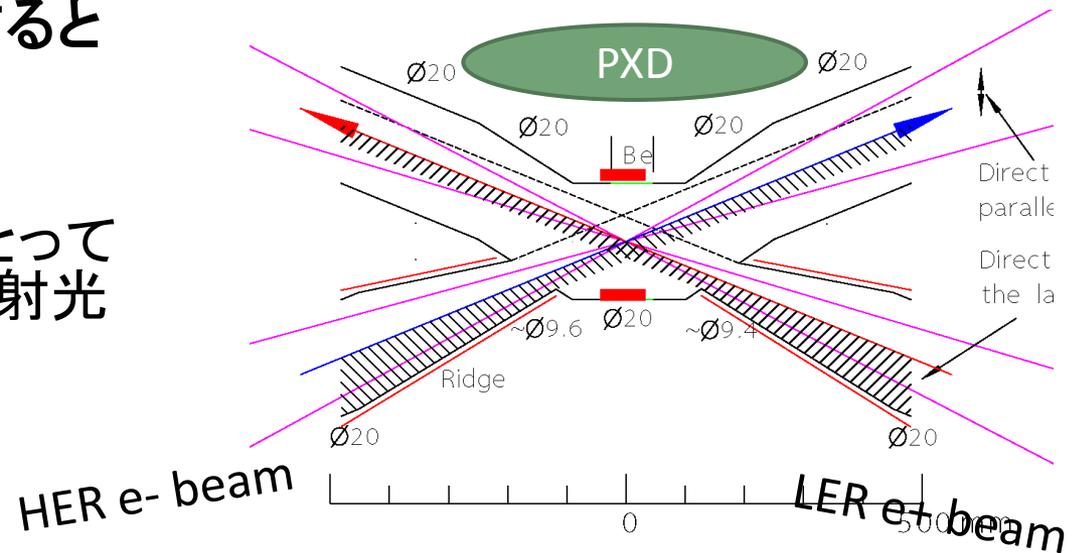
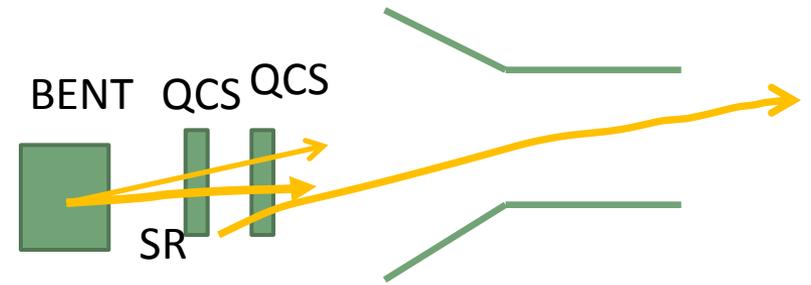
APDの幅(5 mm)を考慮すると、  
前方0.2 度から+ 1.1 度の範囲内には、強いtip-scattering やtip に  
当たることによる乱反射は空気中の場合で、  
入射粒子の  $8.5 \times 10^{-4}$  存在する。

# シンクロトロン放射

- ▶ SuperKEKBでは、電流がKEKBより2倍となるのでシンクロトロン放射のエネルギーは2倍となる
- ▶ 最終収束電磁石が衝突点に近い  
ため多くのシンクロトロン放射(SR)  
が発生し、それが衝突部のビーム  
パイプ直線部のベリリウム部分  
(physics window)に当たって貫  
通し内層の検出器まで達すると  
バックグラウンドノイズとなる

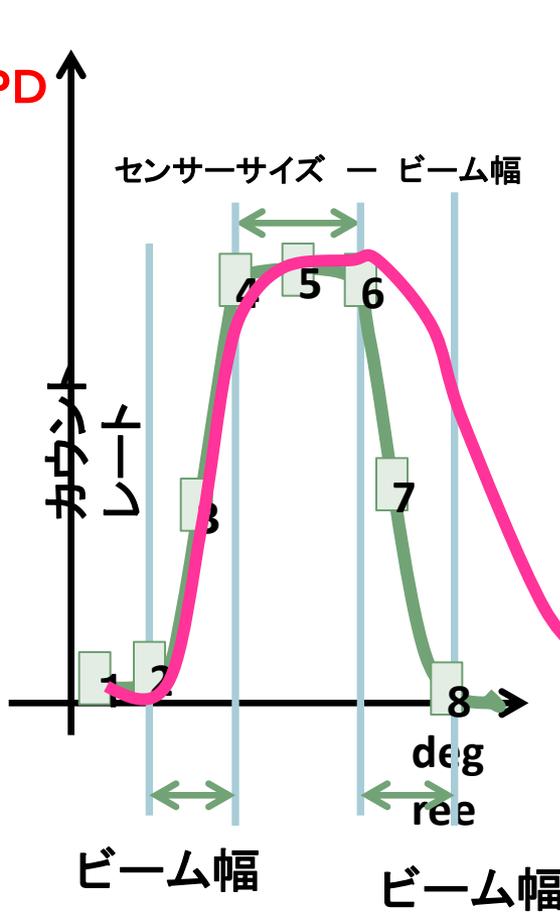
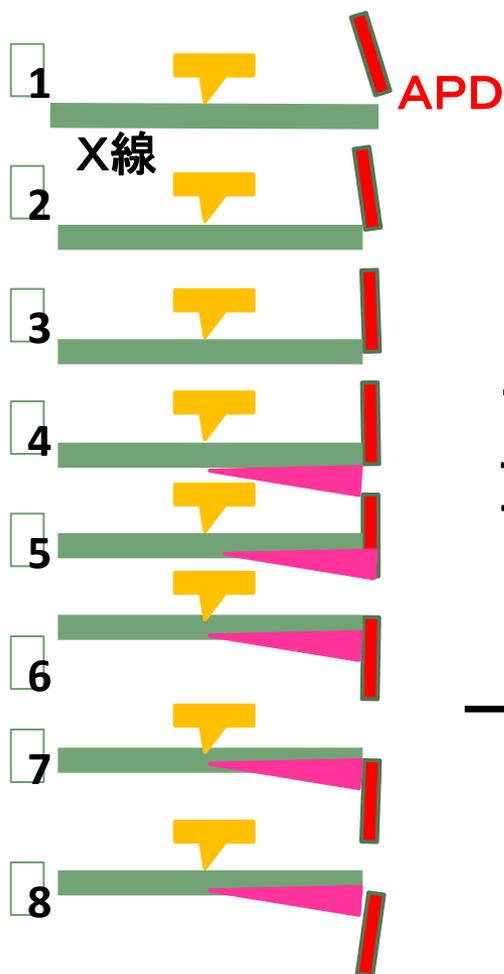
最内層にあるPXD検出器にとって  
問題となるシンクロトロン放射光

**5-20keV**のエネルギー



# ①タンタルtip部にX線を照射する

## 散乱角度分布測定



2-4、6-8 →この角度範囲がビーム幅  
4-6 →プラトー部=センサーサイズ-ビーム幅

散乱が起こった場合の形は、グラフでの6-8のテールが崩れた形になりX線ビーム幅よりテール幅が大きくなることが予想できる。

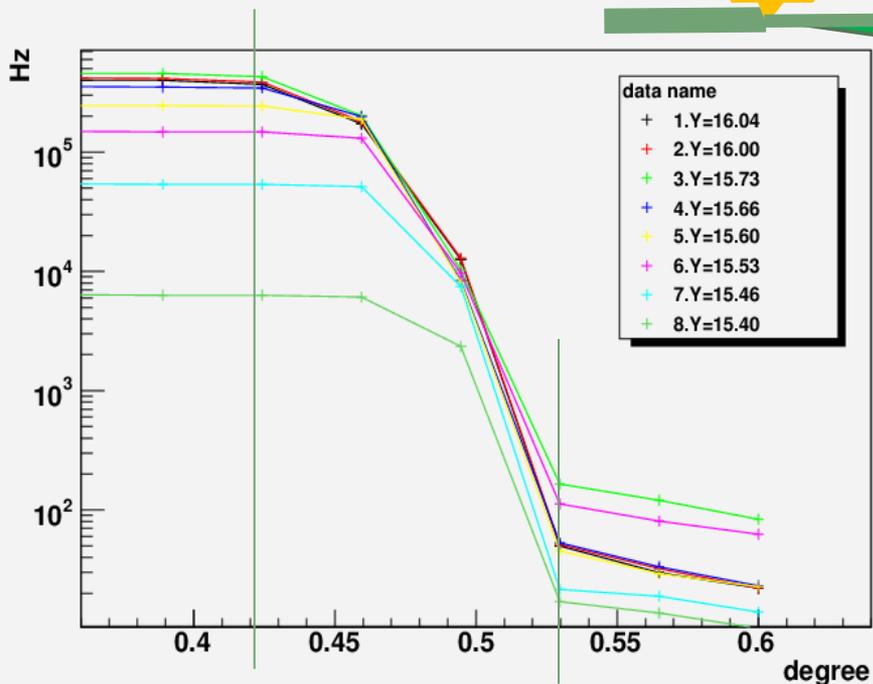
大角度で強いtip-scatteringがあった場合、ビーム0点の位置から外れた位置にピークをもつグラフとなる

θ軸を回転させたときのX線とAPDの様子。

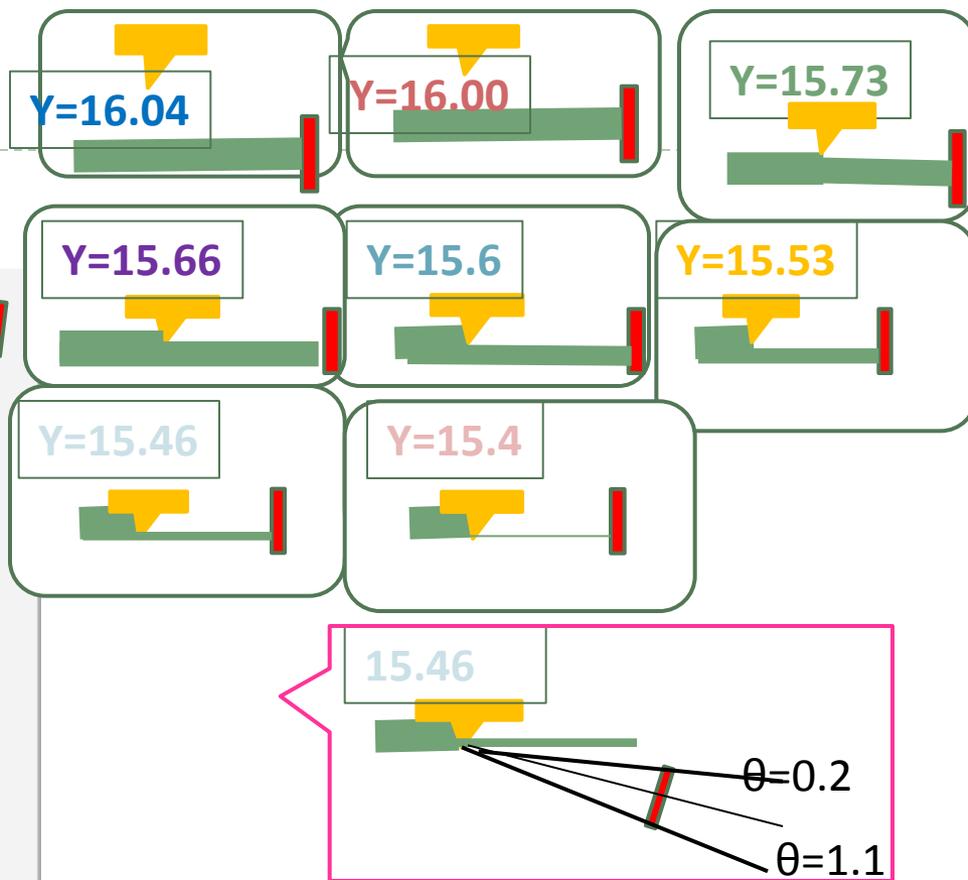
# ①タンタルtip部にX線を照射する

## tip-scatteringの結果

tip時にX線を照射したときのグラフの  
両端を縦軸logにし拡大したもの

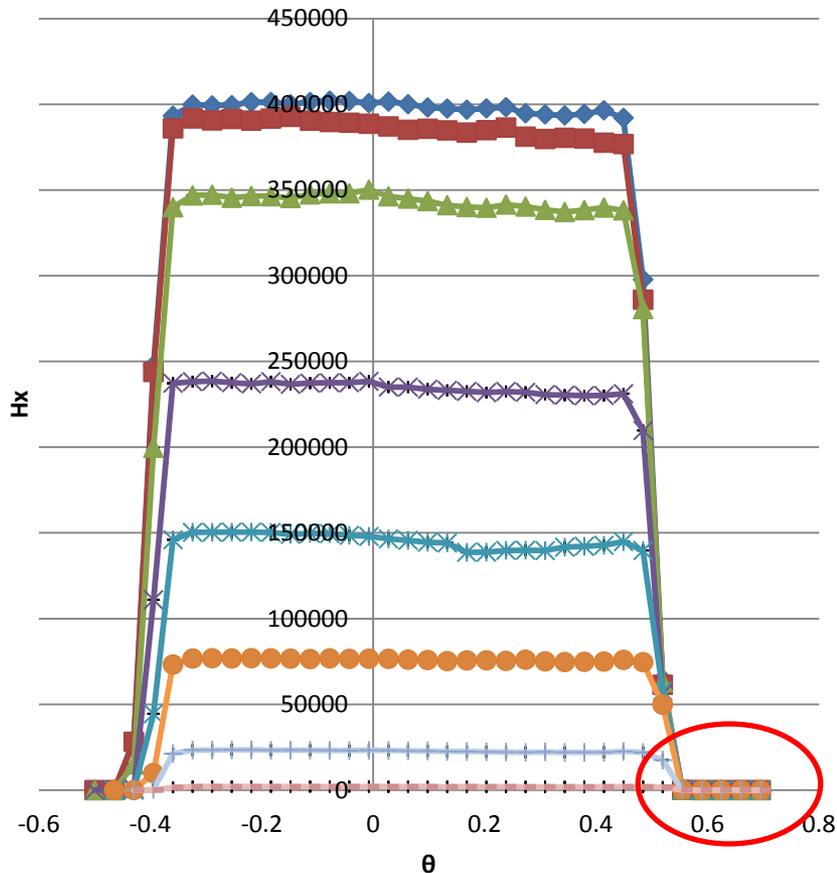
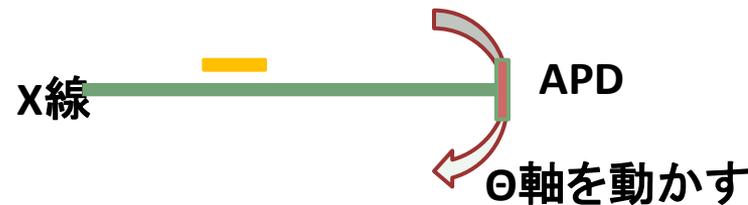


ビームの広がりは0.11度以下

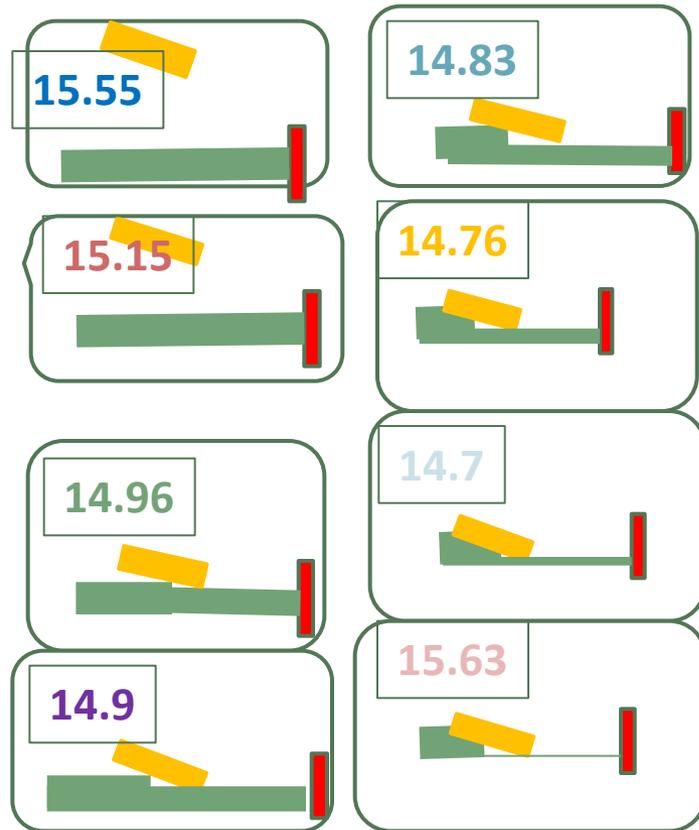


入射photon =  $4.00 \times 10^5$  photons  
反射photon = 62 photons  
APDの幅(5 mm)を考慮すると、  
前方0.2度から+ 1.1度の範囲内には、  
強いtip-scattering やtip に当たることによる乱反  
射は空気中の場合で、  
入射粒子の  $1.5 \times 10^{-4}$  存在する。

# 結果



- ◆ 15.55
- 15.15
- ▲ 14.96
- ✕ 14.9
- ✱ 14.83
- 14.76
- + 14.7
- 14.63



測定した  $\theta = -0.6 \sim 0.7$

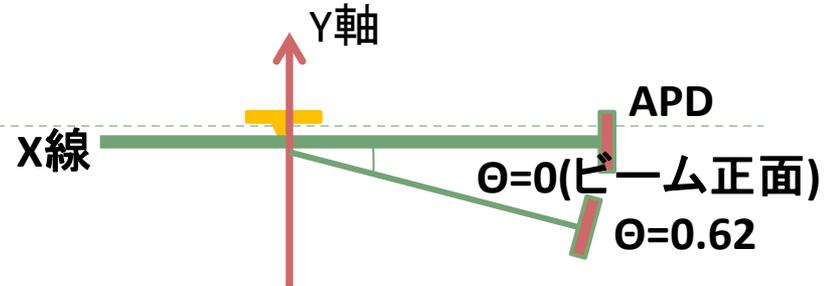
予想; In 0.33 ~ 1.27 degree, the count rate is  $2 \times 10^5$  Hz .

すべての場合で、 $\theta=0.6$  のところでは、10-20Hzしか観測されなかった。

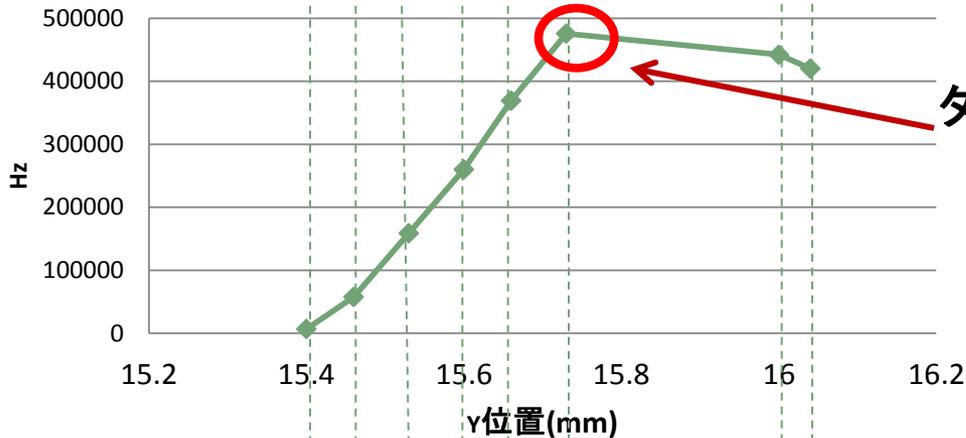
# ①tip部への入射

PhotonFactoryでの測定

## 結果



### $\theta=0$ 度でのカウントレート



タンタルにX線が当たり始める

統計誤差のばらつきより反射光子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。  
→この誤差の原因は分からない。  
⇒ $0+100\%$ (=平均反射カウント数/入射カウント数)を反射率とする。

### 入射光子

$$(\theta=0\text{度での傾き}) \div \text{ビーム幅} = \text{Hz/cm}^2 = 2.3 \times 10^7 \text{ Hz/cm}^2$$

### 反射光子

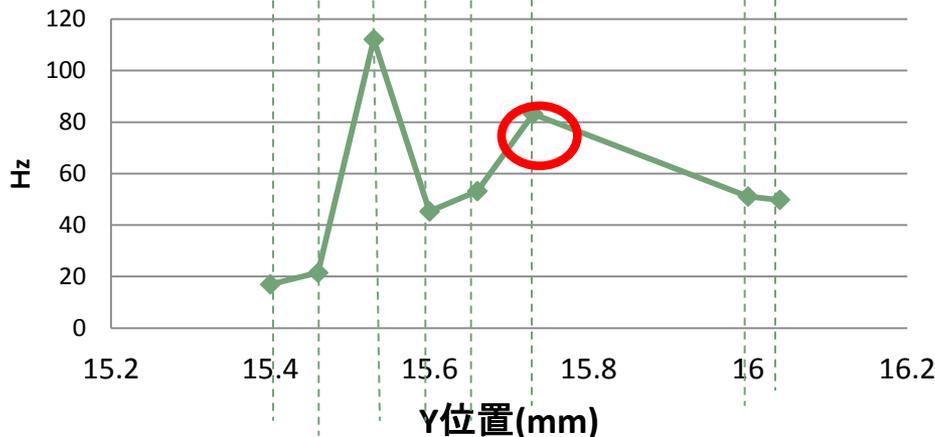
平均値; 66カウント

バックグラウンド; 50カウント

APD位置 $\theta=0.62$ 度でのタンタルにX線が照射している状態の平均カウントレート  $\div$  APDサイズ

$$= 2.6 \times 10^2 \text{ Hz/cm}^2 \text{ 以下}$$

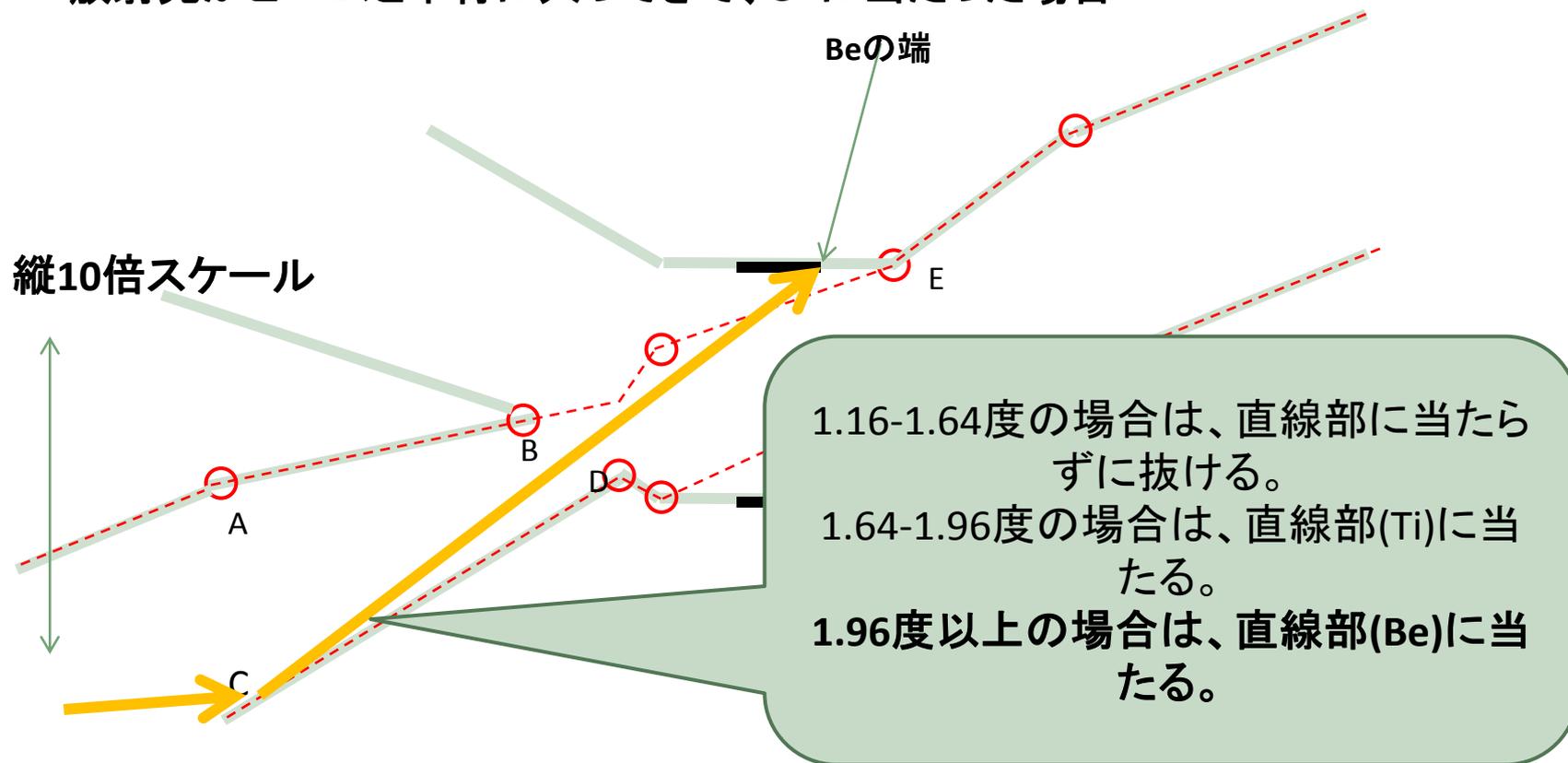
### $\theta=0.62$ 度(ビーム位置と外れた点)でのカウントレート



# ①tip部への入射

考察; 今回の実験データによるバックグラウンドの評価

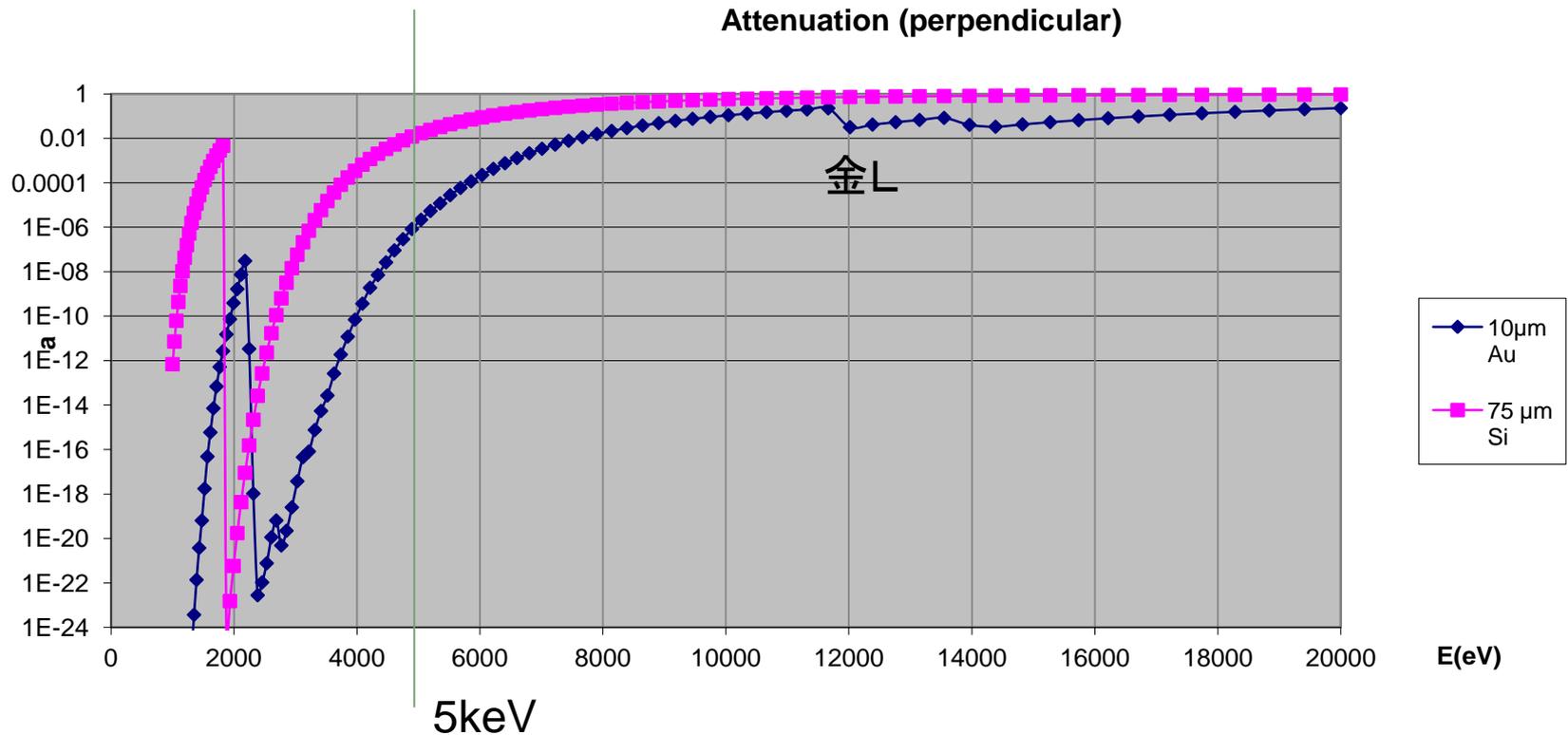
放射光がビームと平行に入ってきて、c に当たった場合



**この経路が最も低角度で反射しBeパイプに入射する可能性あり**

1.96度付近での入射光子と反射光子をX線発生装置の結果から考える

# Gamma Background



金M

$E < 5 \text{ keV}$ : background (almost) independent of Si thickness  
(but efficiently absorbed by Au)

$E > 5 \text{ KeV}$ : background proportional to Si thickness  
(and Au becomes more transparent)

Need rate and spectrum!