

光のハンドリング

SPring-8/JASRI
後藤俊治

1

内容

シンクロトロン放射光をハンドリングする機器の集合体 (ビームライン)
について, SPring-8のX線ビームラインの例を中心にして概説する.

アウトライン

- 放射光, X線に関する基本的なこと
- ビームライン分類
- ビームラインの構成
 - 光源
 - フロントエンド
 - 光学系・輸送チャンネル
- 光学系各論
 - 全反射ミラー
 - 分光器
 - 結晶分光後の強度の見積り
 - 偏光の制御
 - 空間コヒーレンスに関連して

2

放射光, X線に関する基本的なこと (1)

- 波長～光子エネルギー～パワーの関係 -

- ・放射光は電磁波である.

X線領域になると光子1個 // として扱うことが多い.

- ・波長 λ の光子1個の有するエネルギー

$$E[\text{J}] = h[\text{J}\cdot\text{s}]\nu[\text{s}^{-1}] = h[\text{J}\cdot\text{s}]c[\text{m/s}]/\lambda[\text{m}]$$

$$E[\text{eV}] = h[\text{J}\cdot\text{s}]c[\text{m/s}]/\lambda[\text{m}]/e[\text{C}]$$

実用的には

$$E[\text{eV}] = 1239.84/\lambda[\text{nm}]$$

例) 波長 0.1 nmのX線光子1個は12.4 keVのエネルギーを有する

- ・放射パワーと単位時間当たりに放射される光子数

単色の場合: $P[\text{W}] = n[\text{s}^{-1}]e[\text{C}]E[\text{eV}]$

連続スペクトルの場合: $P = \int en(E)E dE$

例) 波長 0.1 nm のX線 10^{10} photons/s $\rightarrow 2 \times 10^{-5}$ W

3

放射光, X線に関する基本的なこと (2)

- 放射光の角度発散など -

- ・リングに蓄積された電子のエネルギーと放射光の角度発散の関係

ローレンツ因子 (電子の相対的なエネルギー): $\gamma = \frac{E_b}{mc^2}$

偏向電磁石からの放射光の典型的な角度発散: $1/\gamma$

例) 2.5 GeVの場合 $1/\gamma = 200 \mu\text{rad}$

8 GeVの場合 $1/\gamma = 64 \mu\text{rad}$

- ・角度について (ラジアンと度～秒)

放射光の角度発散, 全反射ミラーの視射角, 分光結晶の回折幅などにおいて, しばしば mrad, μrad のオーダーの数値がでてくる.

$$360^\circ = 2\pi \text{ rad}$$

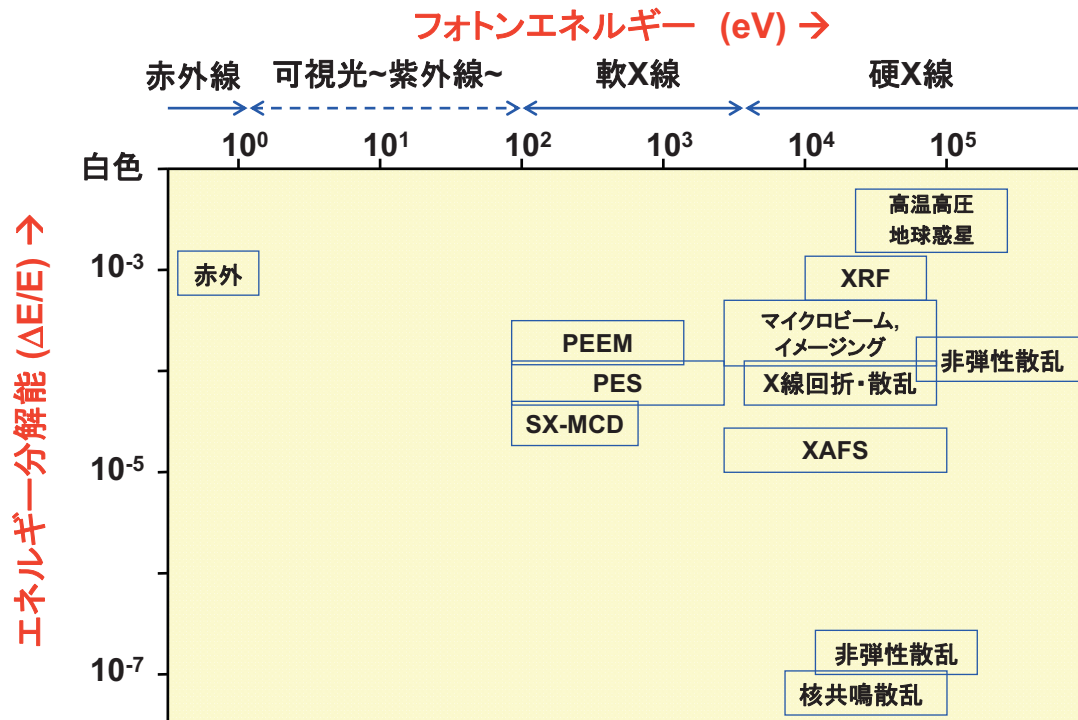
$$1^\circ = 17.5 \text{ mrad}$$

~

$$1'' = 4.85 \mu\text{rad}$$

4

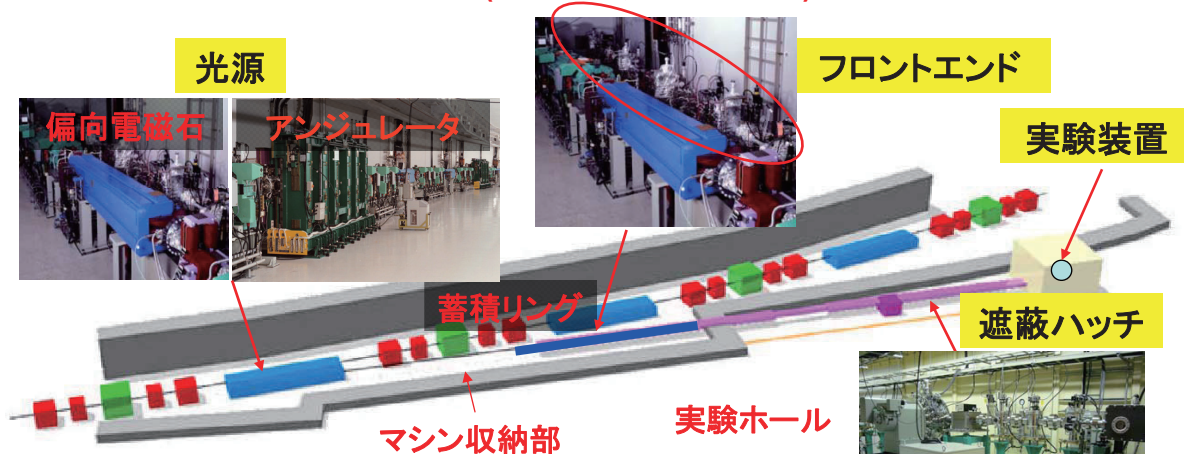
ビームライン分類 (エネルギー領域&分解能)



5

ビームラインの構成

ビームライン = 蓄積リング～光源 (挿入光源, 偏向電磁石)と実験ステーションの橋渡し



→ 光の供給

光子エネルギー, エネルギー分解能の選択,
空間的・角度的ビーム広がり等の加工

→ 真空の維持

加速器およびビームラインの真空の維持

→ 放射線防護

放射線遮蔽, 放射線安全の確保

光学系・輸送チャンネル

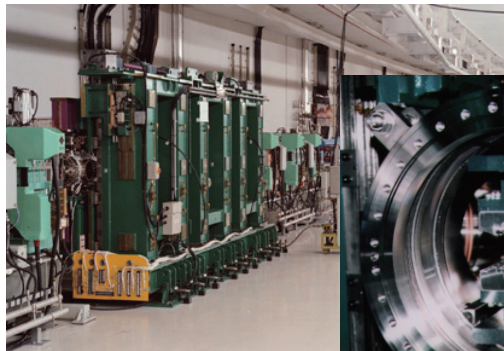
分光器, ミラー
シャッタ, スリット
真空ポンプなど

6

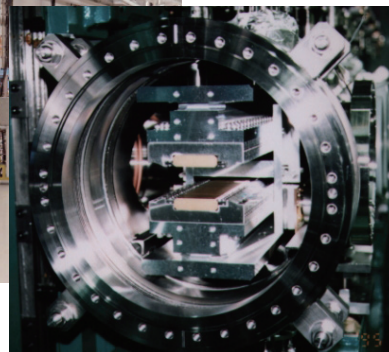
光源 (1)



偏向電磁石

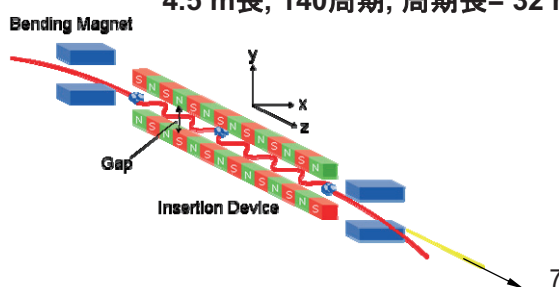
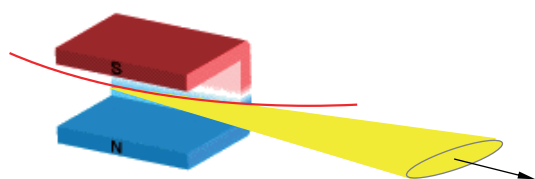


挿入光源



例) BL47XU用標準アンジュレータ

4.5 m長, 140周期, 周期長= 32 mm



7

光源 (2)

偏向電磁石~挿入光源

偏向電磁石

広いエネルギー範囲, 連続スペクトル

広いビーム (大きな試料)

アンジュレータ (第三世代光源の主流)

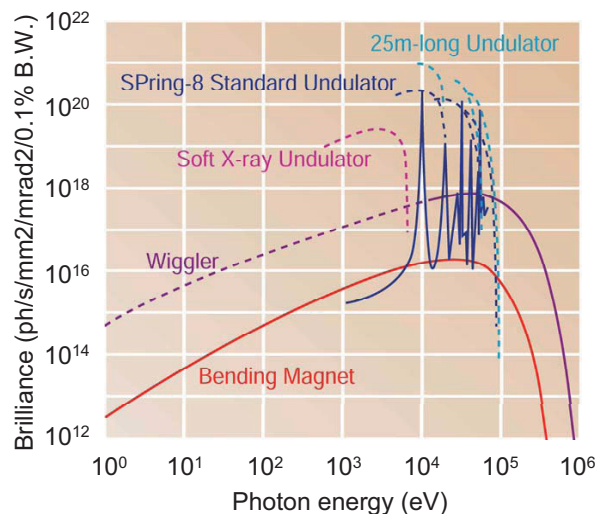
高輝度ビーム, 準単色光 (1% bw程度)

マイクロ/ナノ集光ビームなど

ウィグラー

高エネルギーX線の利用 (> 100 keV)

→ 短周期アンジュレータへの置き換え

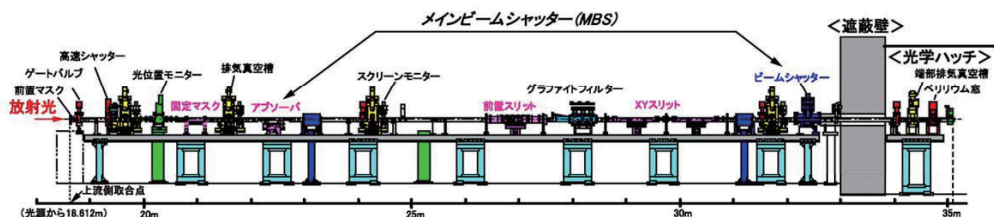


SPring-8の場合の輝度

パワー, 輝度, フラックス密度, 部分フラックス,..
などは計算コードにより計算することが可能

例) "SPECTRA" by T. Tanaka & H. Kitamura

フロントエンド



(例) アンジュレータビームライン用フロントエンド (SPring-8)

光源出力 14 kWのうち500 W分を光学系・輸送チャンネルに送り出す

(1) 真空排気槽 (イオンポンプなど): 真空の維持 ($10^{-9} \sim 10^{-7}$ Pa)

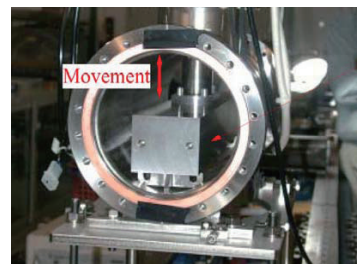
(2) メインビームシャッター: 放射光の導入/遮断

・水冷アブソーバおよびビームシャッター (400 mmタングステンブロック)

(3) マスク, XYスリット: 空間的なパワー制御

・光軸外の余分な放射光成分を除去

(4) 水冷ベリリウム窓: 光学系・輸送チャンネルとの真空の仕切り



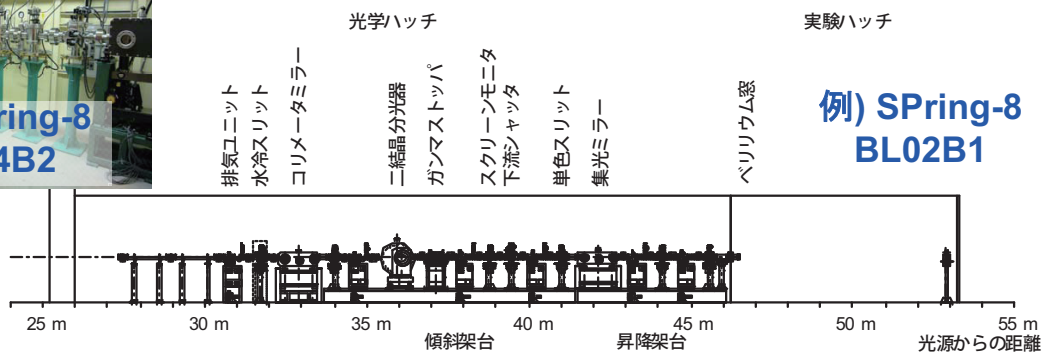
ビームシャッター内部

400 mmのタングステンブロック

光学系・輸送チャンネル



例) SPring-8
BL14B2



輸送チャンネルコンポーネント

真空排気ユニット
下流シャッター
ガンマストップパ
ベリリウム窓
スクリーンモニター

ガスによる散乱, 吸収を軽減. 光学素子の汚染を軽減
実験ステーションへのビームの導入と遮断
放射光に付随してくるガンマ線を遮断
ビームライン終端でX線を大気に取り出す
ビームの位置や強度を確認する

光学系コンポーネント

全反射ミラー
結晶分光器

ビーム集光, 高エネルギー成分除去など
白色放射光から単色X線を取り出す

全反射ミラー

X線領域では屈折率は1よりわずかに小さい

$$n = 1 - \delta \quad (\delta \ll 1)$$

媒質が単一の元素からなるとき,

$$\delta = \frac{r_e \lambda^2}{2\pi V_a} \left(f_0 \left(\frac{\sin(\phi/2)}{\lambda} \right) + f'(\lambda) \right) \quad \rightarrow \text{前方散乱のとき: } \delta = \frac{r_e \lambda^2}{2\pi V_a} (Z + f'(\lambda))$$

異常分散項が無視できるときは、波長の二乗に比例する。

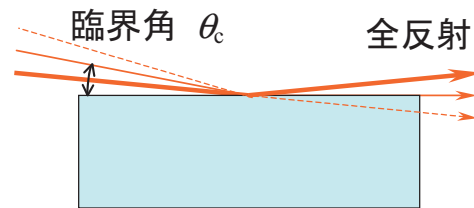
(フォトンエネルギーの二乗に反比例する)

電子密度 (単位体積あたりの電子数 Z/V_a) に比例する。

臨界角以下で全反射が生じる

$$\frac{\cos \theta_c}{\cos 0} = \frac{n}{1} \quad (\text{Snellの法則より})$$

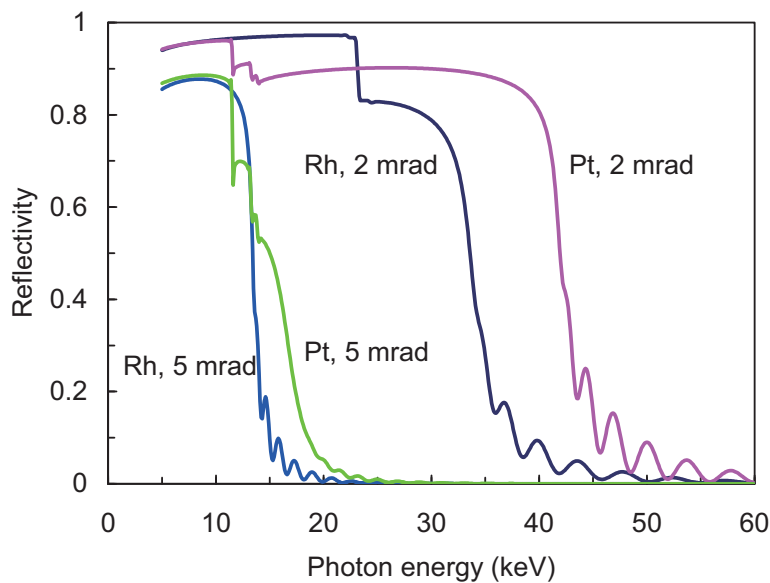
$$\theta_c = \sqrt{2\delta} \approx \text{const} \sqrt{\rho \lambda}$$



Pt, Rhなどで $\delta \sim 10^{-5}$ ($\lambda \sim 0.1 \text{ nm}$) $\rightarrow \theta_c \sim \text{数mrad}$

11

ミラー反射率の計算例



膜厚 50 nm, 表面粗さ 1 nm

12

ミラー材質, 視射角, 長さ

□ 母材

白色用 (熱負荷あり): Si

単色用 (熱負荷なし): SiO₂, 低膨張ガラスなど

□ コーティング材

Pt, Rh, Niなど

使用エネルギー, 反射率, 吸収端の関係から選択

□ 視射角

2~10 mrad程度 (SPring-8 X線ビームラインの場合)

使用エネルギー, 反射率, 吸収端の関係から選択

□ ミラーの長さ

400 mm~1 m

ビームサイズと視射角によって決まる

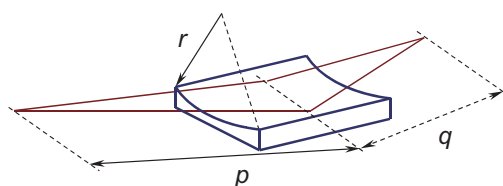
(例) 100 μrad × 50 m / 5 mrad = 1 m

13

ミラーによる集光

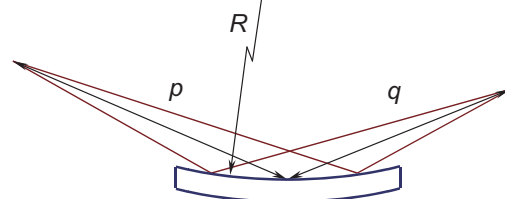
楕円ミラー, 回転楕円ミラー, 放物面ミラー, 回転放物面ミラー

→ 円筒面ミラー, トロイダルミラーで近似



$$r = \frac{2pq}{p+q} \sin \theta$$

サジタル集光



$$R = \frac{2pq}{(p+q) \sin \theta}$$

タンジェンシャル集光

例) $\theta = 5$ mrad, $p = 40$ m, $q = 10$ mの場合

$r = 80$ mm, $R = 3.2$ km

※ $q \rightarrow \infty$ の場合

$$r = 2p \sin \theta$$

反射ビームを平行化できる

$$R = 2p / \sin \theta$$

14

ミラー本体およびミラー調整機構



アンジュレータビームライン用

400 mm長ミラー調整機構縦偏向型

位置決め精度: 0.2 μm, 角度決め精度: 0.2 μrad

タンジェンシャル方向湾曲機構付 (R: kmオーダー)



偏向電磁石ビームライン用

1 m長ミラー調整機構縦偏向型

側面間接水冷機構付 (白色対応)

位置決め精度: 0.2 μm, 角度決め精度: 0.2 μrad

タンジェンシャル方向湾曲機構付 (R: kmオーダー)

15

湾曲ミラーによる集光

タンジェンシャルの湾曲ミラーを用いた集光におけるビームサイズ

$$F_{\text{coma}} = 2.35\Sigma M$$

$$F_{\text{spherical}} = \frac{3L^2\theta(1-M^2)}{16pM}$$

$$F_{\text{fabrication}} = 2 \times 2.35\Delta_{\text{fabrication}} Mp$$

$$F_{\text{total}} = \left[(F_{\text{coma}} + F_{\text{spherical}})^2 + F_{\text{fabrication}}^2 \right]^{1/2}$$

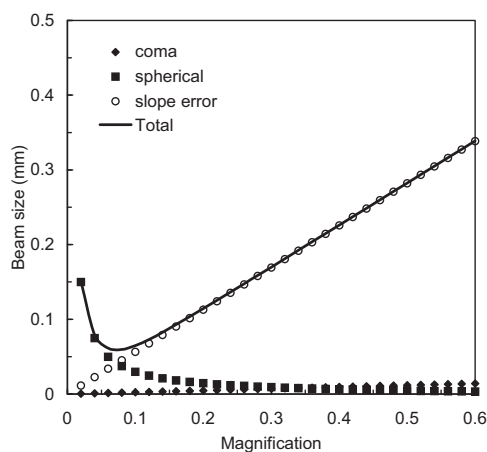
Σ : 光源サイズ

M : 縮小率 = q/p

L : ミラー長

$\Delta_{\text{fabrication}}$: スロープ誤差

θ : 視射角



計算例

$\Sigma = 10 \mu\text{m}$

$L = 400 \text{ mm}$

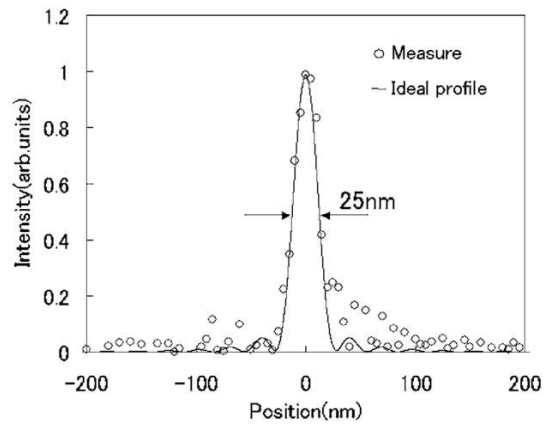
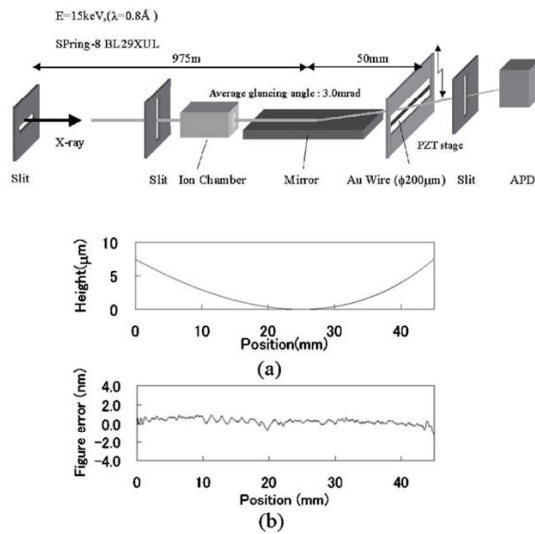
$\Delta_{\text{fabrication}} = 3 \mu\text{rad}$

$\theta = 4 \text{ mrad}$

$p = 40 \text{ m}$

マイクロ/ナノビーム集光には、ベントミラーではなく、精密に理想形状に加工され、また、大きな開口数を有するミラーを用いる必要がある。

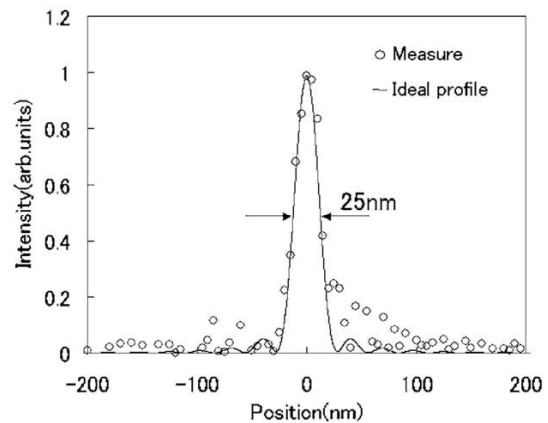
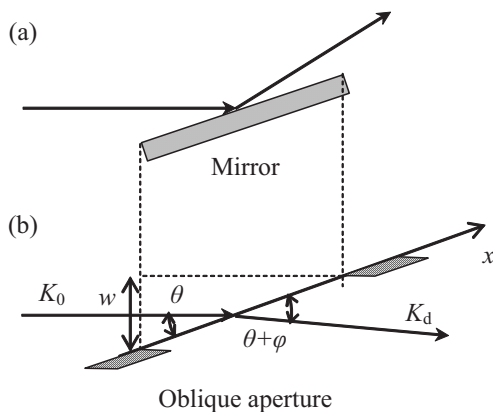
ミラーによる回折限界集光 (1)



ナノメートルオーダーの表面形状誤差で精密に加工された楕円ミラーによる極限集光
 → 開口数が集光ビームサイズを決める

H. Mimura et al.,
 Appl. Phys. Lett. 90, 051903 (2007)

ミラーによる回折限界集光 (2)



傾斜スリットモデルによる見積り

→ Fraunhofer回折による角度ひろがり

$$FWHM_{\phi} = 2.7831 \frac{\lambda}{\pi w} \approx 0.8858 \frac{\lambda}{L \sin \theta}$$

→ 距離qにおける空間ひろがり

$$FWHM_x = 0.8858 \frac{\lambda q}{L \sin \theta}$$

$$\theta_{ave} = 3 \text{ mrad}$$

$$\lambda = 0.083 \text{ nm } (E = 15 \text{ keV})$$

$$L = 45 \text{ mm}$$

$$q = 50 \text{ mm}$$

→ FWHM = 27 nm

結晶分光器

X線ビームラインにおいて必要不可欠な光学系コンポーネント

□ 分光の原理 完全な単結晶によるBragg反射

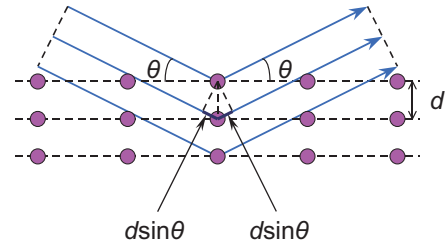
$$2d \sin \theta = n \lambda$$

d : 格子面間隔, θ : 視射角, λ : X線の波長

□ 分光結晶 Si, ダイヤモンドなど

□ 結晶分光器の機能

- (i) 所定のエネルギーのX線を分光し取り出すこと
- (ii) エネルギー幅を実験に必要なものに制御すること
- (iii) 通常用いられる二結晶分光器では、エネルギーを変えても分光器を出射して試料に至るまでの光軸を変えないこと
- (iv) 結晶の曲げによりビームを集光すること
- (v) 放射光の熱負荷に対処し、所定の冷却機能を有すること



19

分光可能なエネルギー範囲

SPring-8標準分光器の場合

□ 反射面

Si 111反射, $2d = 0.627$ nm

Si 311反射, $2d = 0.328$ nm

Si 511反射, $2d = 0.209$ nm

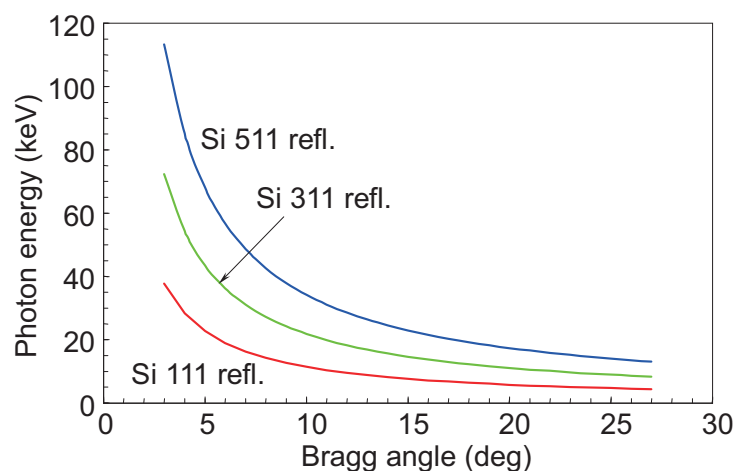
...

□ Bragg角の範囲

$3 \sim 27^\circ$

□ エネルギー範囲

4.4 ~ 110 keV



20

ロッキングカーブ (吸収のない場合)

ロッキングカーブ (ダーウィンカーブ)
 - ブラッグケース, 吸収なし, 十分厚い結晶の場合 -

$$R = \frac{|\chi_h|}{\gamma_0} \left| \frac{E_h}{E_0} \right|^2 = (W + \sqrt{W^2 - 1})^2 \quad (W < -1)$$

$$R = 1 \quad (-1 \leq W \leq 1) \quad \leftarrow \text{全反射領域}$$

$$R = (W - \sqrt{W^2 - 1})^2 \quad (W > 1)$$

W : Bragg条件からのずれをあらわす
 規格化されたパラメータ

対称ブラッグケース, σ 偏光の場合:

$$W = \left\{ \Delta\theta \sin 2\theta_{BK} + \chi_{0r} \right\} \frac{1}{|\chi_{hr}|}$$

χ_{0r}, χ_{hr} : 電気感受率のフーリエ成分

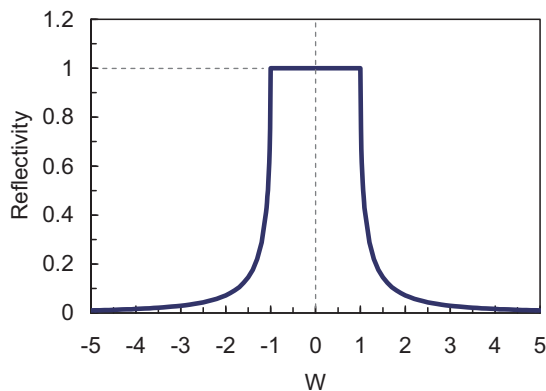
屈折率との関係: $n = 1 - \delta = 1 + \frac{\chi_{0r}}{2}$

ダーウィン幅 $\leftarrow \Delta W = 2$

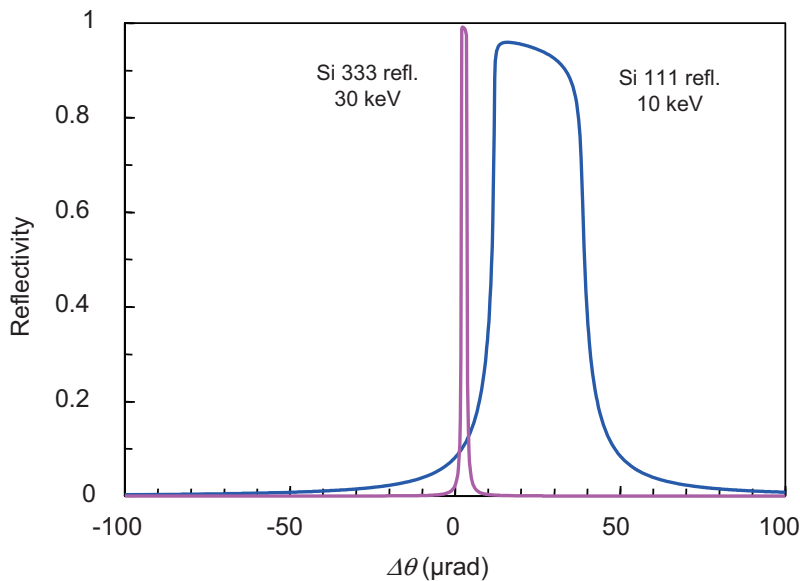
$$\omega = \frac{2|\chi_{hr}|}{\sin 2\theta_{BK}} \propto |F_h|$$

エネルギー分解能や分光後の強度を
 見積もるための重要なパラメータ

21



ロッキングカーブ (吸収を考慮)



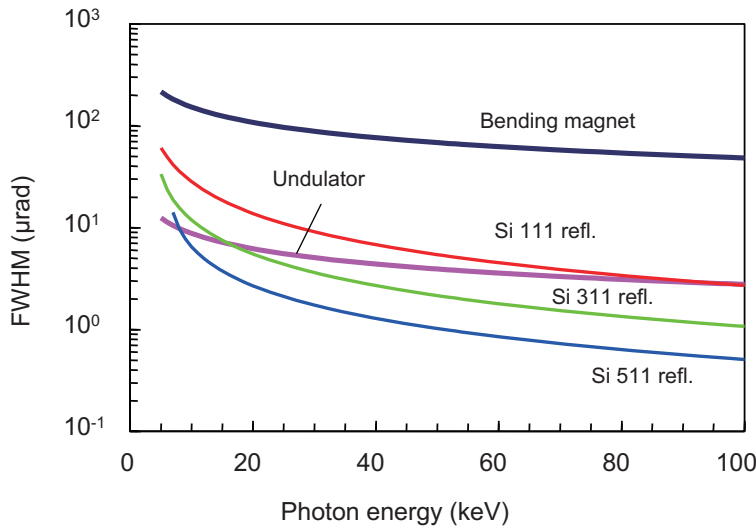
完全結晶における動力学回折理論にしたがう

- ・回折幅は数十 μrad 以下のオーダー
- ・吸収が小さければピーク反射率は1に近い

22

回折幅および光源の発散

SPring-8, $E_b = 8 \text{ GeV}$ の場合



偏向電磁石

$$\sigma_{r'} \approx 0.597 \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_c}} \propto \sqrt{\frac{1}{\hbar\omega}}$$

$$FWHM = 2.355\sigma_{r'}$$

$$FWHM \approx 90 \mu\text{rad} @ \lambda_c$$

アンジュレータ ($N = 140$)

$$\sigma_{r'} \approx \sqrt{\frac{\lambda}{2N\lambda_u}} \propto \sqrt{\frac{1}{\hbar\omega}}$$

$$FWHM \approx 8 \mu\text{rad} @ \lambda = 0.1 \text{ nm}$$

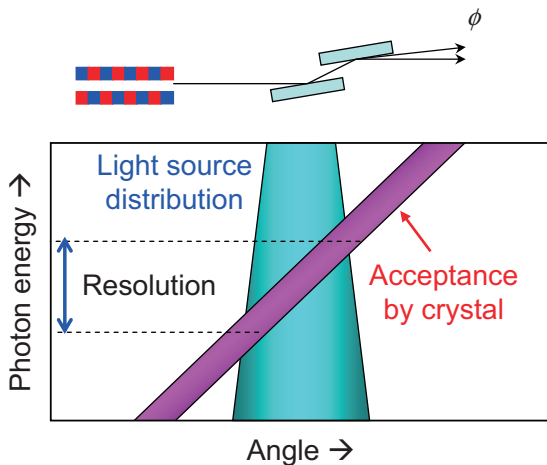
アンジュレータの角度発散は低次の回折幅と同程度である

23

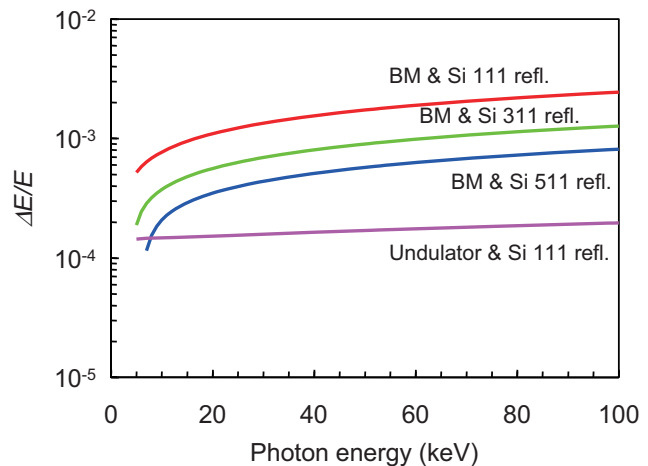
エネルギー分解能

$$\frac{\Delta E}{E} = \cot \theta_B \sqrt{\Omega^2 + \omega^2}$$

Ω : 光源の発散角, ω : 回折幅



DuMondダイアグラム



通常の条件では $\Delta E/E = 10^{-3}$ 程度以下である

24

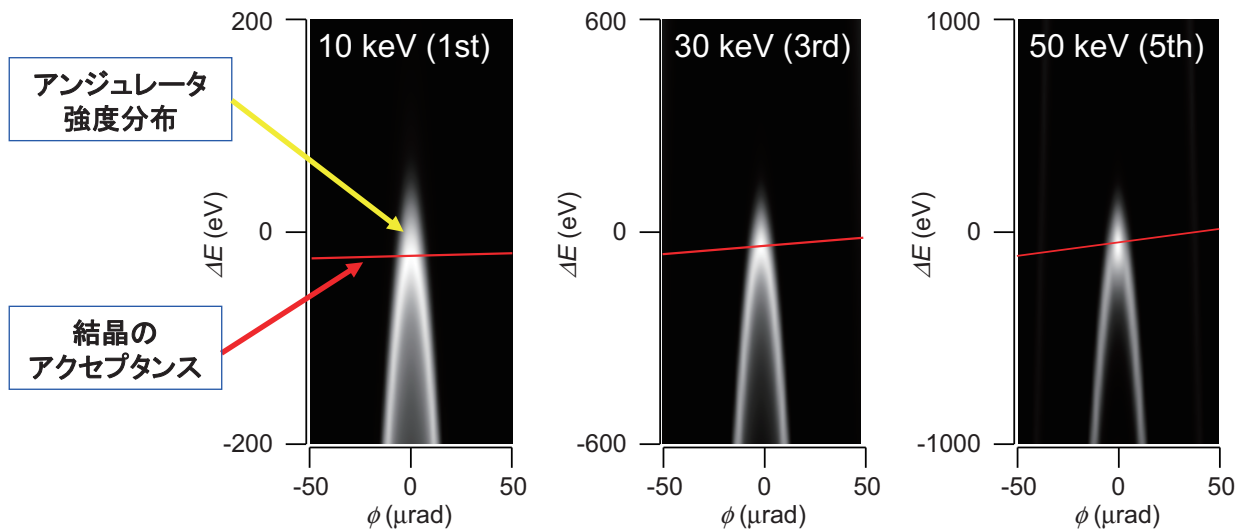
アンジュレータビームを結晶分光器で切り出す



SPring-8標準アンジュレータ

($\lambda u = 32$ mm, $N = 140$, $K = 1.34$, $E_{1st} = 10$ keV)

+ 二結晶分光器 (Si 111反射)



縦方向にスリットを広げ過ぎても分光されない低エネルギー成分が増えるだけ

25

二結晶分光器 -定位置出射の原理-

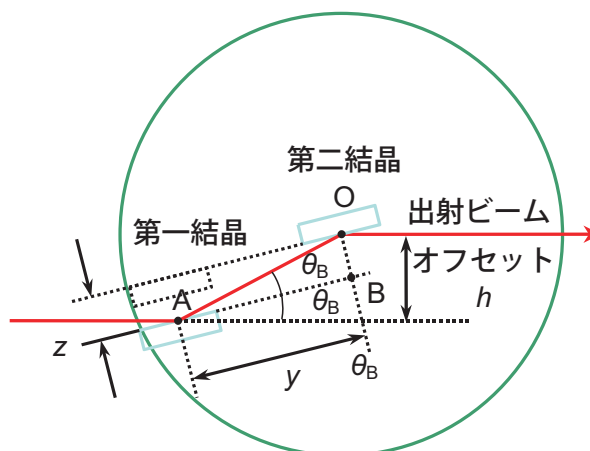
定位置出射= Bragg角 (X線の波長) を変化させても
出射ビームの位置, 方向を一定に保つ便利な機構

前提)

第一, 第二結晶は同一面間隔
かつ, 反射面が平行

$$y = AB = \frac{h}{2 \sin \theta_B}$$

$$z = OB = \frac{h}{2 \cos \theta_B}$$

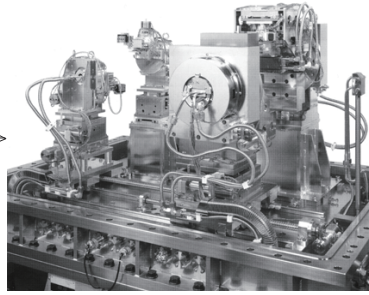
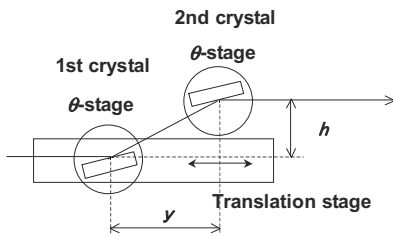


y ($\theta_B \rightarrow 90^\circ$), z ($\theta_B \rightarrow 0^\circ$) とともに $h/2$ に漸近する

26

二結晶分光器の例

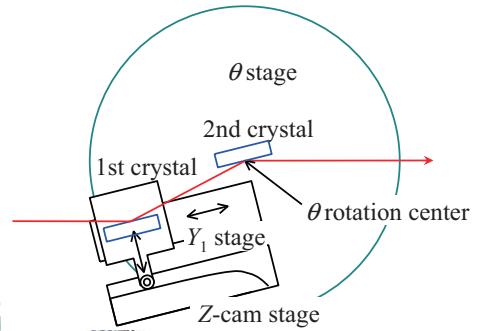
$\theta_1 + \text{併進} + \theta_2$ 式



SPring-8 BL15XU

SPring-8 information Vol. 5, No.1 (2000)

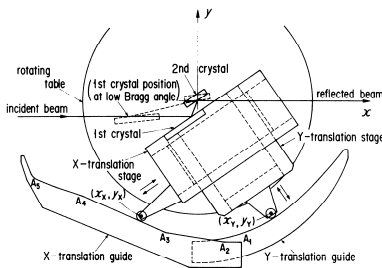
$\theta + 2$ 軸併進式 (1軸カム式)



SPring-8 標準型 27

Yabashi et al., Proc. SPIE 3773, 2 (1999)

$\theta + 2$ 軸併進式 (2軸カム式)



PF BL-4C

Matsushita et al., NIM A246 (1986)

結晶の冷却 (1)

なぜ結晶の冷却が必要か？

Q_{in} (放射光吸収による熱の流入) = Q_{out} (冷却による除熱 + 輻射..)

→ 温度上昇 $\Delta T \rightarrow \alpha \Delta T = \Delta d$ (格子面間隔の変化)

α : 熱膨張係数

or $\rightarrow \Delta \theta$ (熱歪による格子面の曲がり)

- ・第一, 第二結晶の不整合 \rightarrow 波長のドリフト, 強度の損失
- ・融点 or 熱歪限界 \rightarrow 融解 or 破壊へ

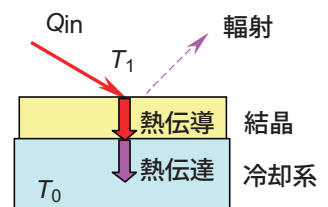
解決策:

熱膨張係数 α , 結晶の熱伝導度 κ , 冷却系への熱伝達係数

(S1) $\kappa / \alpha \rightarrow$ 大きくする (下表参照)

(S2) 冷却系 (冷媒) との接触面積を増やす

(S3) 照射パワー密度を小さくする



結晶冷却のFigure of merit

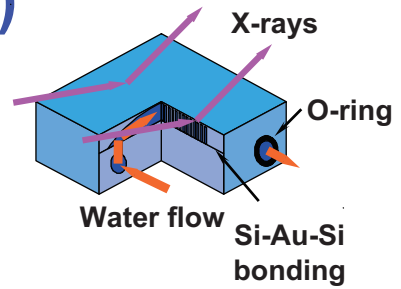
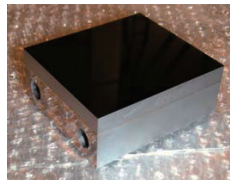
	Silicon (300 K)	Silicon (80 K)	Diamond (300 K)
κ (W/m/K)	150	1000	2000
α (1/K)	2.5×10^{-6}	-5×10^{-7}	1×10^{-6}
$\kappa / \alpha \times 10^6$	60	2000	2000

結晶の冷却 (2)

<偏向電磁石ビームライン用冷却>

照射パワーおよび密度:
~100 W, ~1 W/mm²

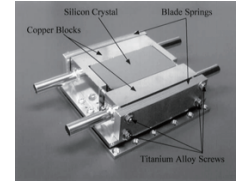
フィン結晶直接冷却 - (S2)



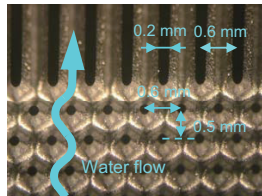
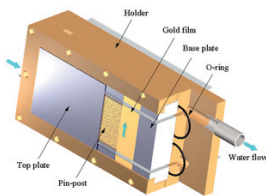
<アンジュレータビームライン用冷却>

リニアアンジュレータ, $N=140$, $\lambda_u=32$ mm
照射パワーおよびパワー密度: 300~500 W,
300~500 W/mm²

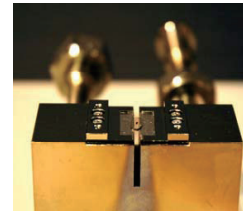
b) シリコン液体窒素冷却 (間接冷却) - (S1)



a) 回転傾斜配置 + シリコンピンポスト結晶 (直接水冷) - (S2) & (S3)



c) IIaダイヤモンド間接水冷 - (S1)



29

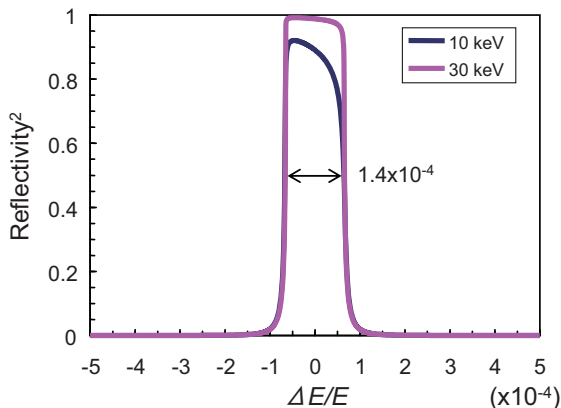
分光後の強度の見積もり (1)

分光後の光子数 (スルー putt) は分光器における
実効的なバンド幅によって見積もることができる:

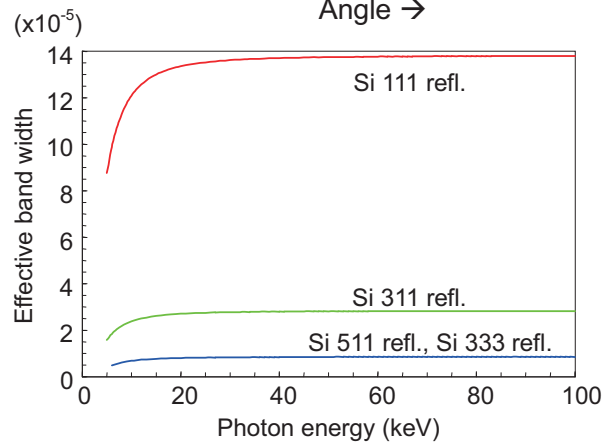
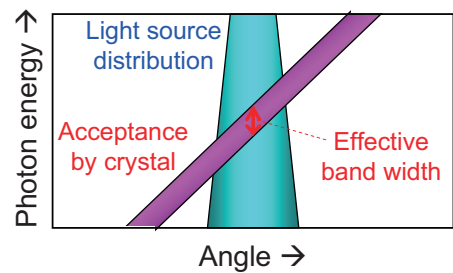
光子数 (ph/s) =

$$\text{光子数 (ph/s)} = \frac{\text{光源からでてくる光子数 (ph/s/0.1\%bw)} \times 1000}{\text{分光器における実効的なバンド幅}}$$

結晶分光におけるバンド幅



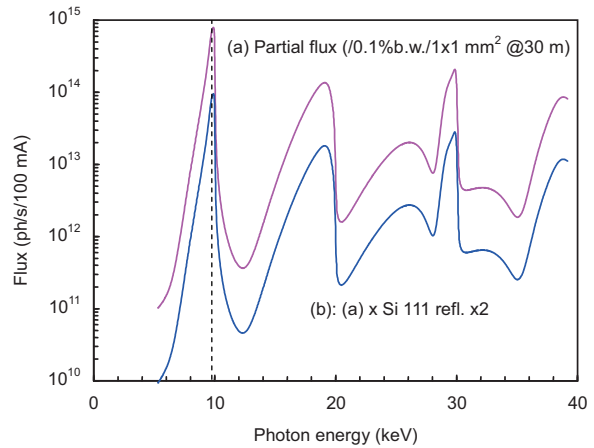
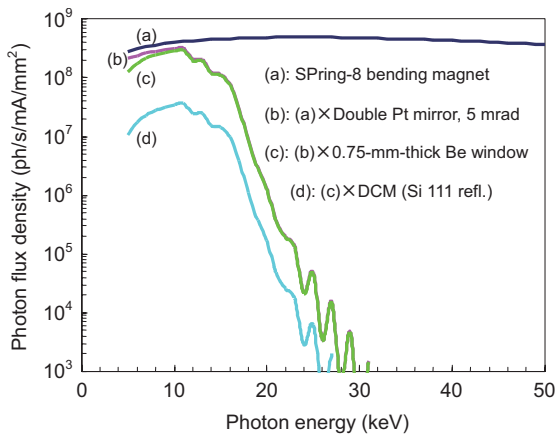
例) Si 111反射 (二結晶分光器) の場合
→ バンド幅は 1.4×10^{-4} でほぼ一定



反射曲線の積分から求めた
実効的なバンド幅

30

分光後の強度の見積もり (2)



偏向電磁石ビームラインの計算例

光源からの距離50 mにおける軸上の光子密度
 (a)~(c): 0.1%バンド幅あたりの強度
 (d): 実効的なバンド幅 ($\sim 1.4 \times 10^{-4}$) を考慮した
 分光後の強度

アンジュレータビームラインの計算例

光源からの距離30 mにおける軸上の光子密度
 (a): 0.1%バンド幅あたりの強度
 (b): 実効的なバンド幅 ($\sim 1.4 \times 10^{-4}$) を考慮した
 分光後の強度

31

偏光の制御 (1)

X線領域では、挿入光源そのものによる偏光の切り替えが難しい。
 (左右円偏光ヘリカルアンジュレータとキッカー電磁石による切り替えなど)
 → リニアアンジュレータ (水平直線偏光) + 移相子

結晶: IIaダイヤモンドなど吸収の少ない完全結晶を利用

原理: 完全結晶における動力的回折において、回折条件から適当な角度ずらすことにより σ 偏光と π 偏光において屈折率の差を与え、所定の厚さだけX線を透過させて必要な位相差 δ を与える。

$\delta = \pm\pi/2$: 水平偏光 → 右-/左-円偏光
 $\delta = \pi$: 水平偏光 → 垂直偏光

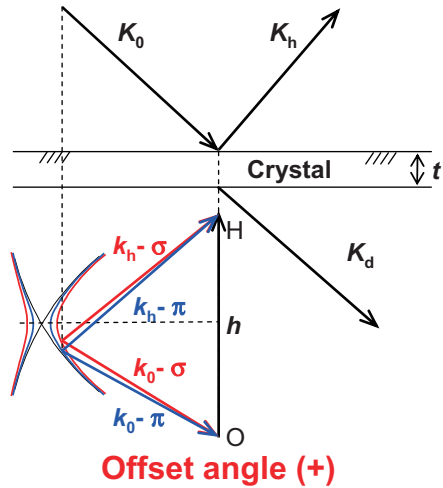
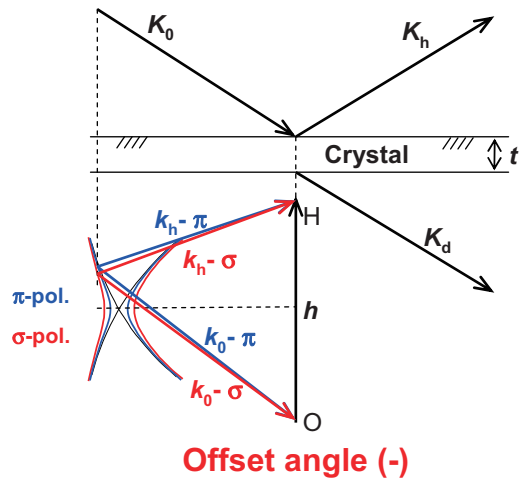
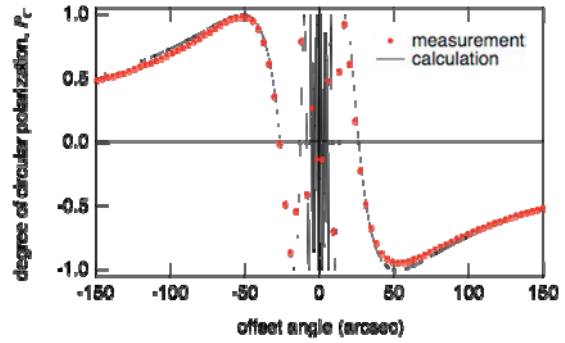
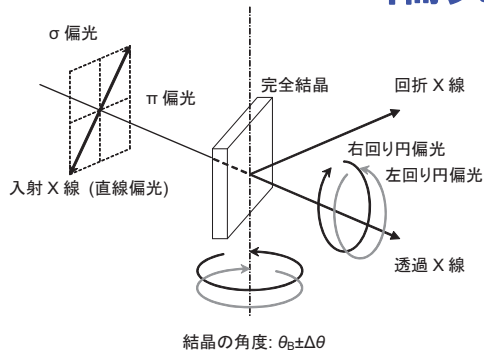
X線磁気円二色性 (XMCD) やその他偏光を利用する実験に使われる。

ダイヤモンド移相子の選択例

Thickness (mm)	Index	Reflection	Energy (keV)	Transmittance (%)
0.34	(111)	111 Bragg	5~5.8	3~7
		220 Laue	5.8~7.5	7~41
0.45	(111)	220 Laue	6~9	5~53
0.73	(111)	220 Laue	8~12	22~65
2.7	(001)	220 Laue	11~16	13~47

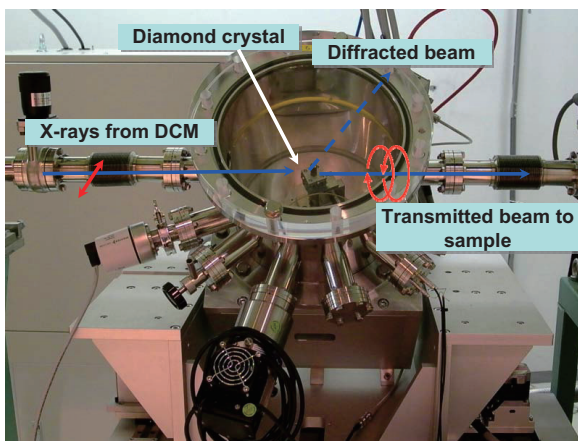
32

偏光の制御 (2)



33

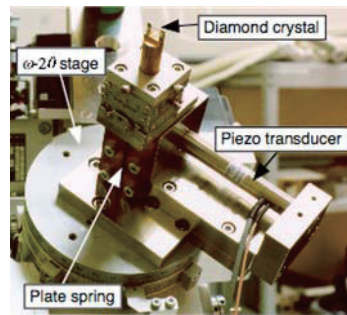
移相子システム (SPring-8 BL39XU)



移相子用ゴニオメータステージ
および真空チェンバ



厚さ0.45 mmの (111) 11a
ダイヤモンド結晶



簡便かつ高速なヘリシティ切り替え
 $f < 100$ Hz (ピエゾ素子)
 $f < 2$ kHz (ガルバノスキャナー)

空間コヒーレンスに関連して

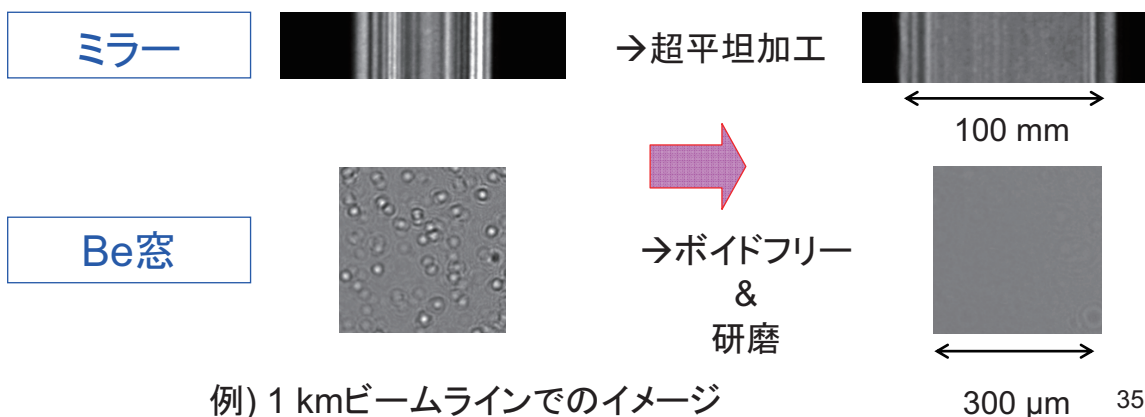
高い空間コヒーレンスを必要とする実験:

- 小さい光源サイズ (σ_s) & 長いビームライン (L)

例) SPring-8の200 m, 1 kmビームライン

$$l_{coh} \propto \frac{\lambda L}{\sigma_s}$$

- スペックルフリー光学系



その他の光学系

今回ふれなかった光学系

- ・回折格子 – VUV~軟X線の分光
- ・多層膜 – 軟X線 ~ X線での分光, 集光, 軟X線移相子
- ・フレネルゾーンプレート – chromatic な集光など
- ・屈折レンズ (X線領域では凹レンズ) – chromaticな集光など
- ・スリット, ピンホール – 寄生散乱除去, 集光光学系の仮想光源など
- ...

参考) 放射光ビームライン光学技術入門 (大橋・平野編, 日本放射光学会) など