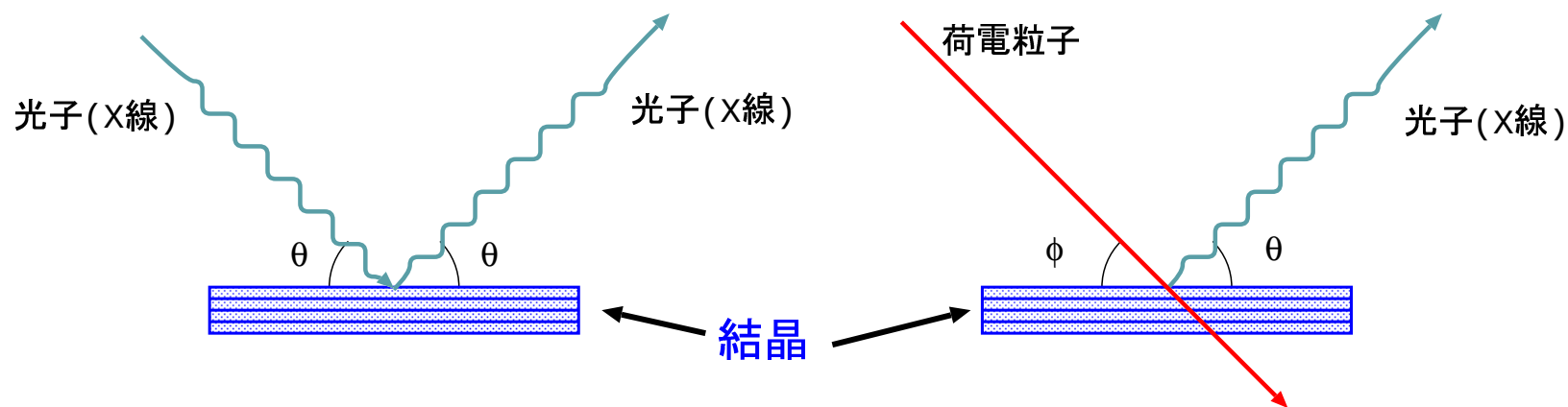


パラメトリック X 線放射の特性

日本大学原子力研究所

早川 恭史

パラメトリック X 線放射 (PXR) とは？



X 線ブラッグ回折

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

↑
格子間隔

↑
X線の波長

パラメトリック X 線放射
(PXR)

$$\theta \sim \phi$$

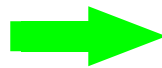
$$2d \cdot \sin \theta \sim n \lambda$$

入射粒子をホワイト X 線から相対論的な荷電粒子に置き換えても同じような散乱 X 線が得られる

P X Rの歴史的経緯

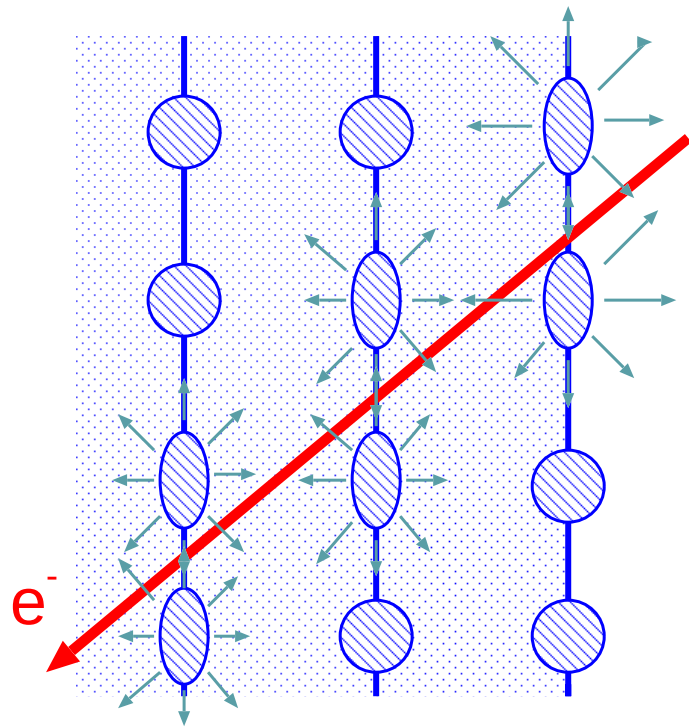
- 共鳴遷移放射の特殊ケースとして予言（1970年代前半）
- ソ連（ロシア）を中心に理論的な研究
- 1980年代後半になってようやく実験的に確認（ソ連）
（素粒子・原子核以外の分野への高エネルギー加速器の応用）
- 1990年代には日本、米国、西ヨーロッパでもP X Rの
基礎研究が行われるようになる

シンクロトロン放射光の
応用によって大きな成果



加速器を用いた新しいX線源
への期待が高まる

PXRの発生メカニズム



1. 相対論的な効果により入射電子の電場が進行方向に圧縮される
2. 電子が近傍通過した瞬間に原子の分極（仮想励起）が発生
3. 分極の発生と消滅に伴う電磁放射
4. 原子が周期的に並んでいるため分極の起こる位置と時間に相関がある

➡ 特定の方にコヒーレントな放射

- ・ 放射の発生メカニズムは遷移放射に近い
- ・ 電子の電場に伴う仮想光子のブラッグ回折に相当

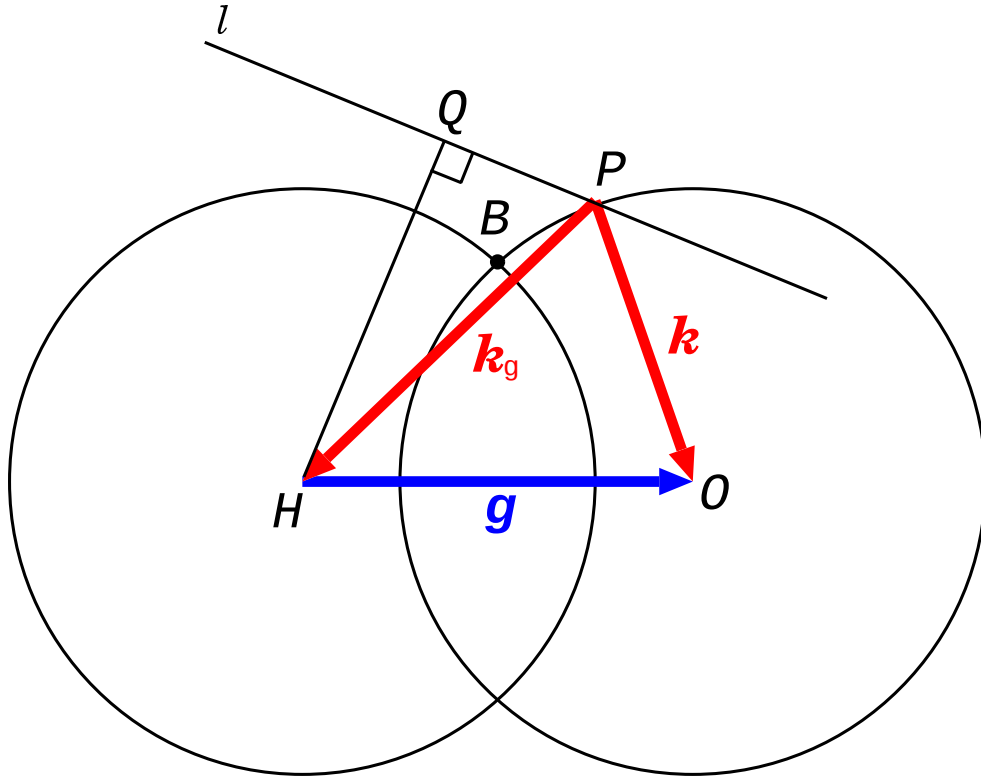


図 1: PXR におけるエwald 球

PXR のエネルギー

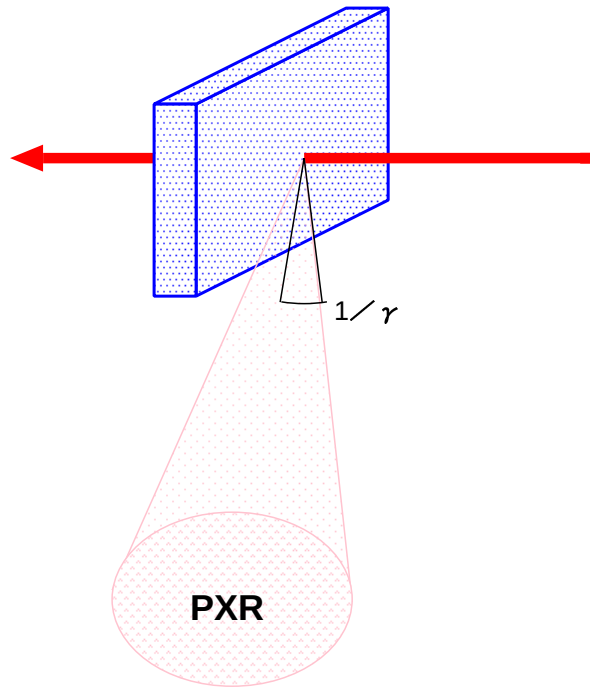
$$\hbar\omega = \frac{\hbar c^* |\mathbf{g} \cdot \mathbf{v}|}{c^* - \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\Omega}}, \quad (0.1)$$

$\mathbf{g}$: 結晶の逆格子ベクトル, c^* : 結晶媒質中での光速, $\mathbf{v}$: 荷電粒子の速度,
 $\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{k}/|\mathbf{k}|$ ($\mathbf{k}$: PXR の波数ベクトル)

PXR の放射強度分布

$$\begin{aligned} \frac{dN}{d\Omega} &= \sum_{g(\neq 0)} \sum_a \frac{\alpha L \omega^3 |\chi_g|^2}{2\pi c v (c - \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\Omega})} \left| \frac{[(\omega/c^2)\mathbf{v} + \mathbf{g}] \cdot \mathbf{e}_{ka}}{|\mathbf{k}_\perp - \mathbf{g}_\perp|^2 + (\omega/v)^2 \gamma^{-2}} \right|^2 \\ &= \sum_{g(\neq 0)} \frac{\alpha L \omega^3 |\chi_g|^2}{2\pi c v (c - \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\Omega})} \left| \frac{[(\omega/c^2)\mathbf{v} + \mathbf{g}] \times \boldsymbol{\Omega}}{|\mathbf{k}_\perp - \mathbf{g}_\perp|^2 + (\omega/v)^2 \gamma^{-2}} \right|^2, \end{aligned} \quad (0.2)$$

PXRの特徴



- 放射強度の電子エネルギー依存性が少ない
(数10MeV程度でもX線が発生)
- $1/\gamma$ の指向性をもつ
- 準単色

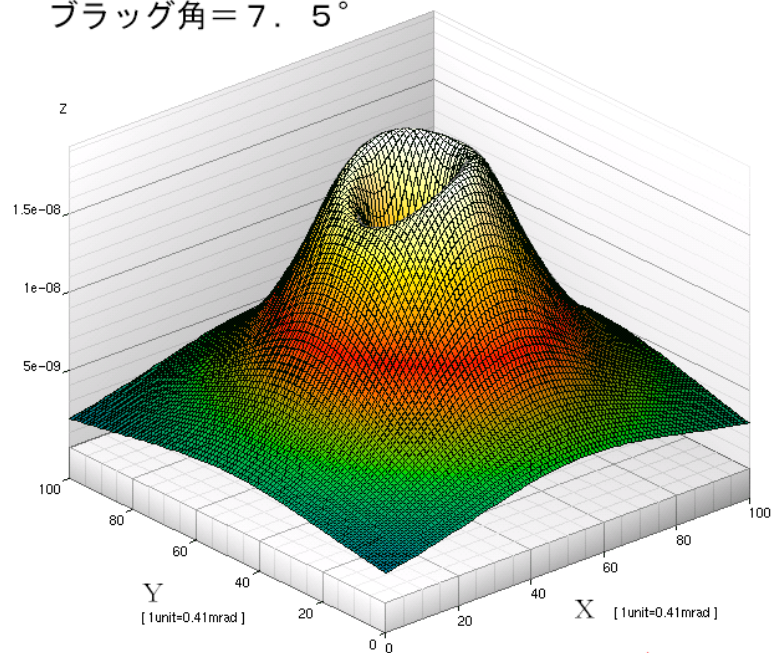


波長は結晶への電子の入射角度に依存

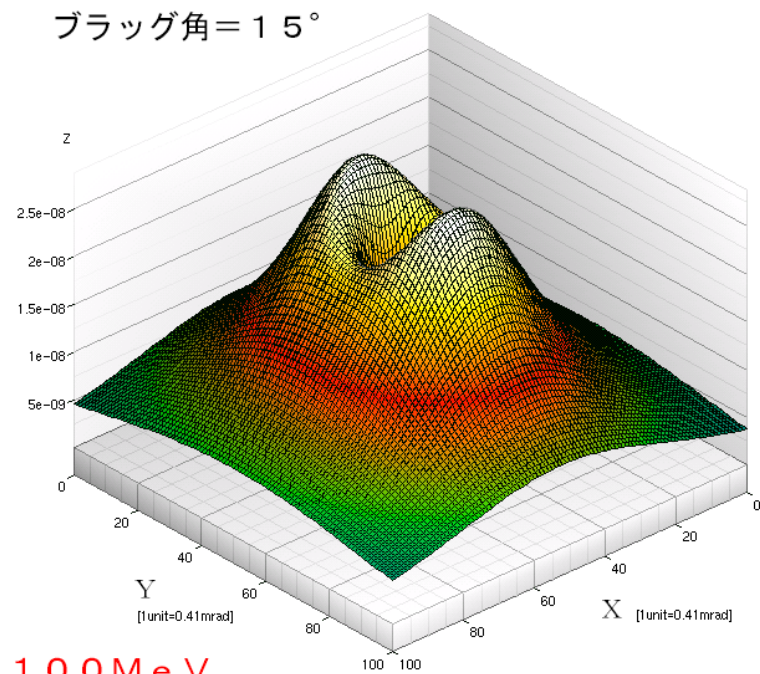
➡ 波長の制御が可能

100MeVクラスの加速器による波長可変
単色X線源の可能性

ブラッグ角 = 7.5°

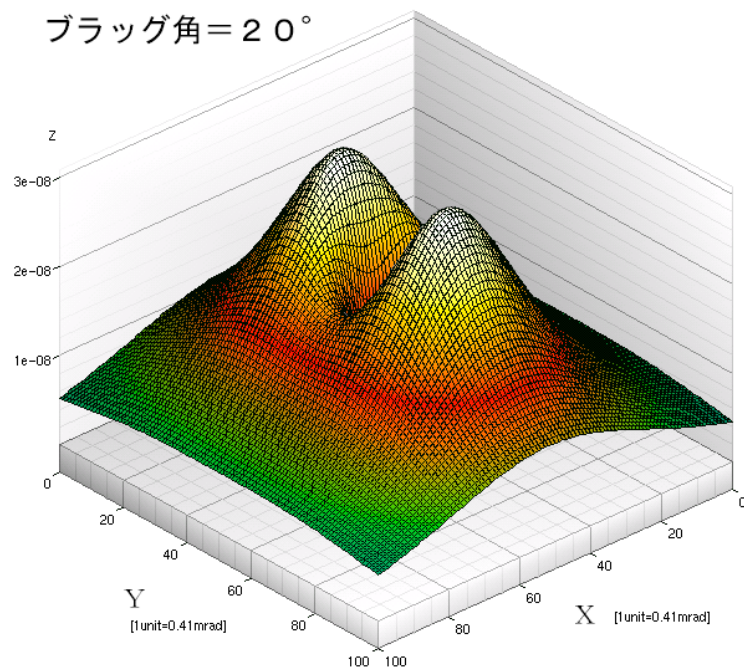


ブラッグ角 = 15°

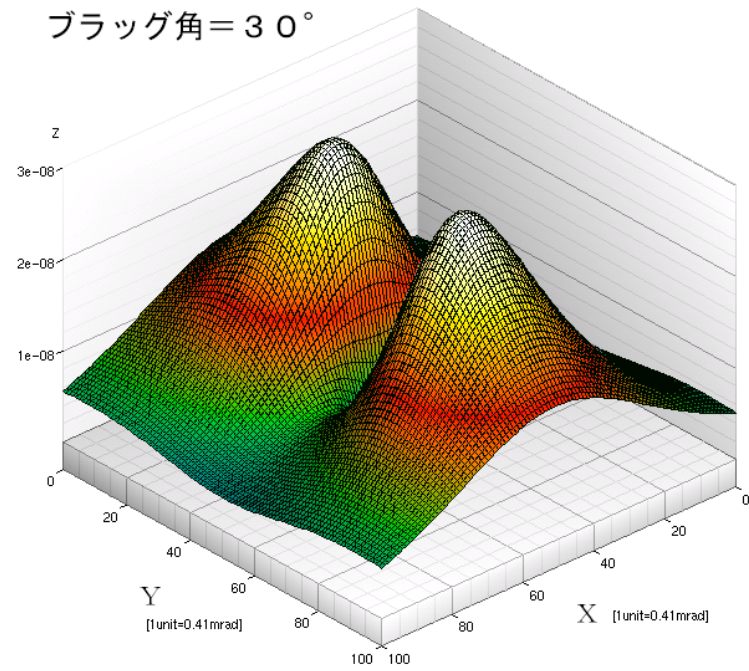


電子ビームエネルギー : 100 MeV

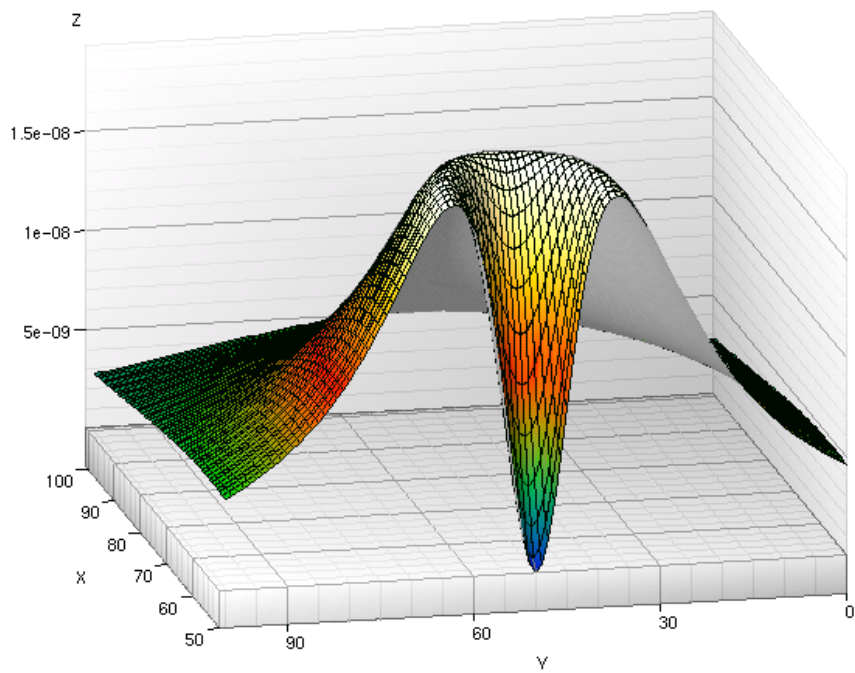
ブラッグ角 = 20°



ブラッグ角 = 30°

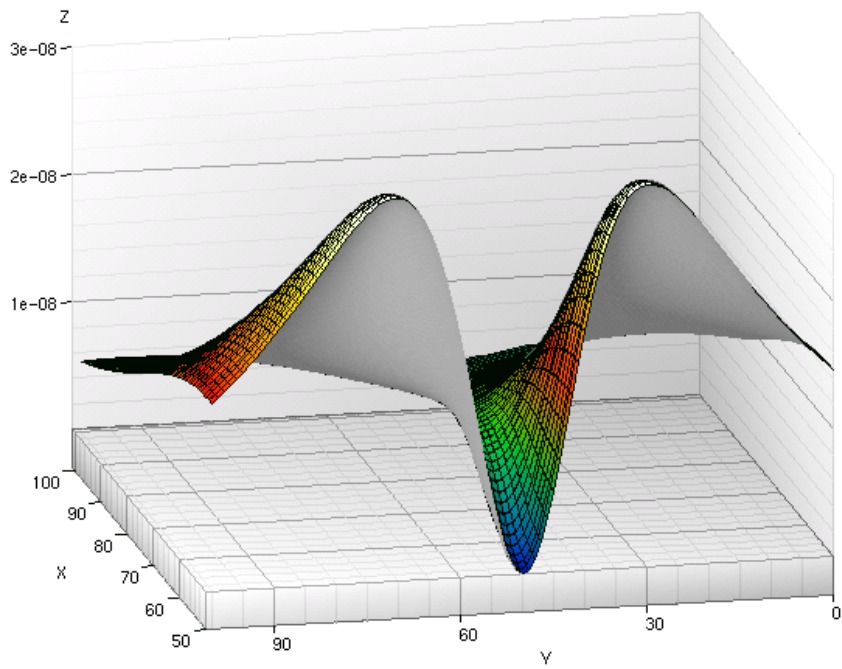


ブラッグ角 = 7.5°

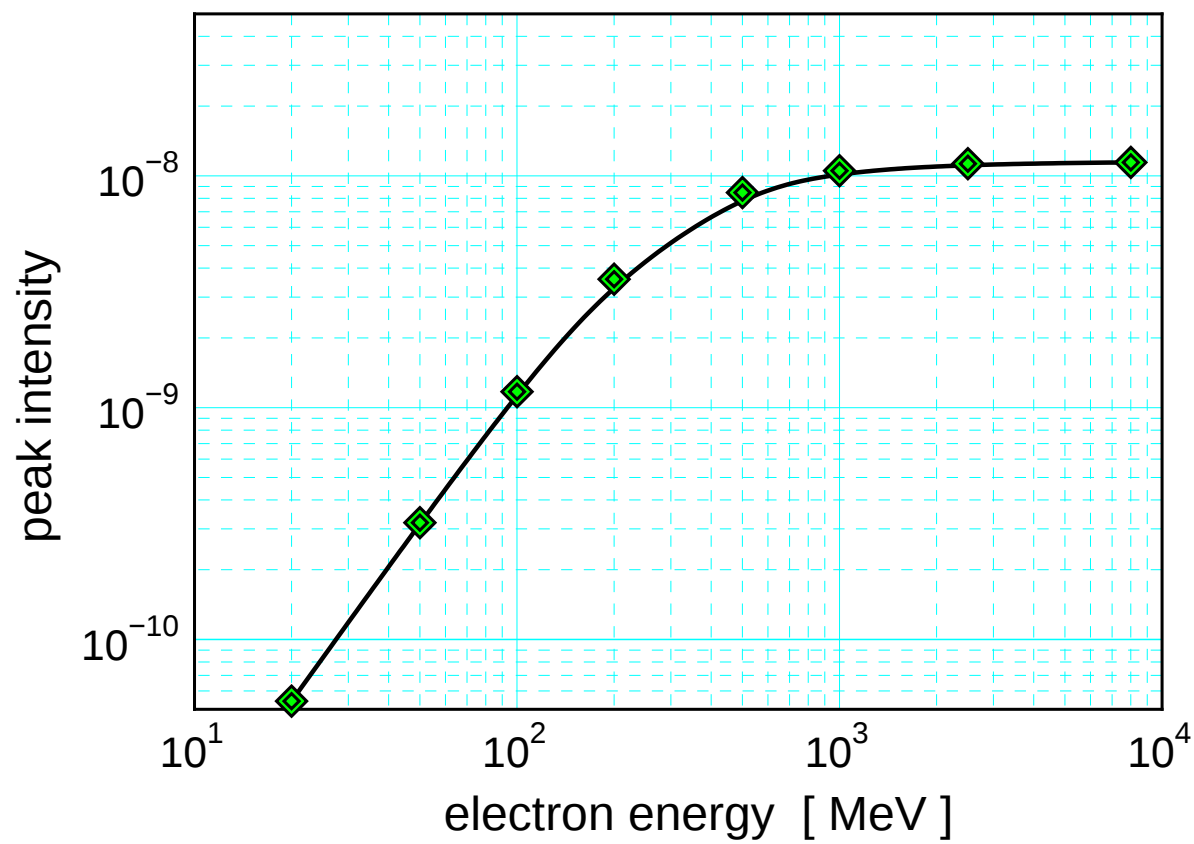
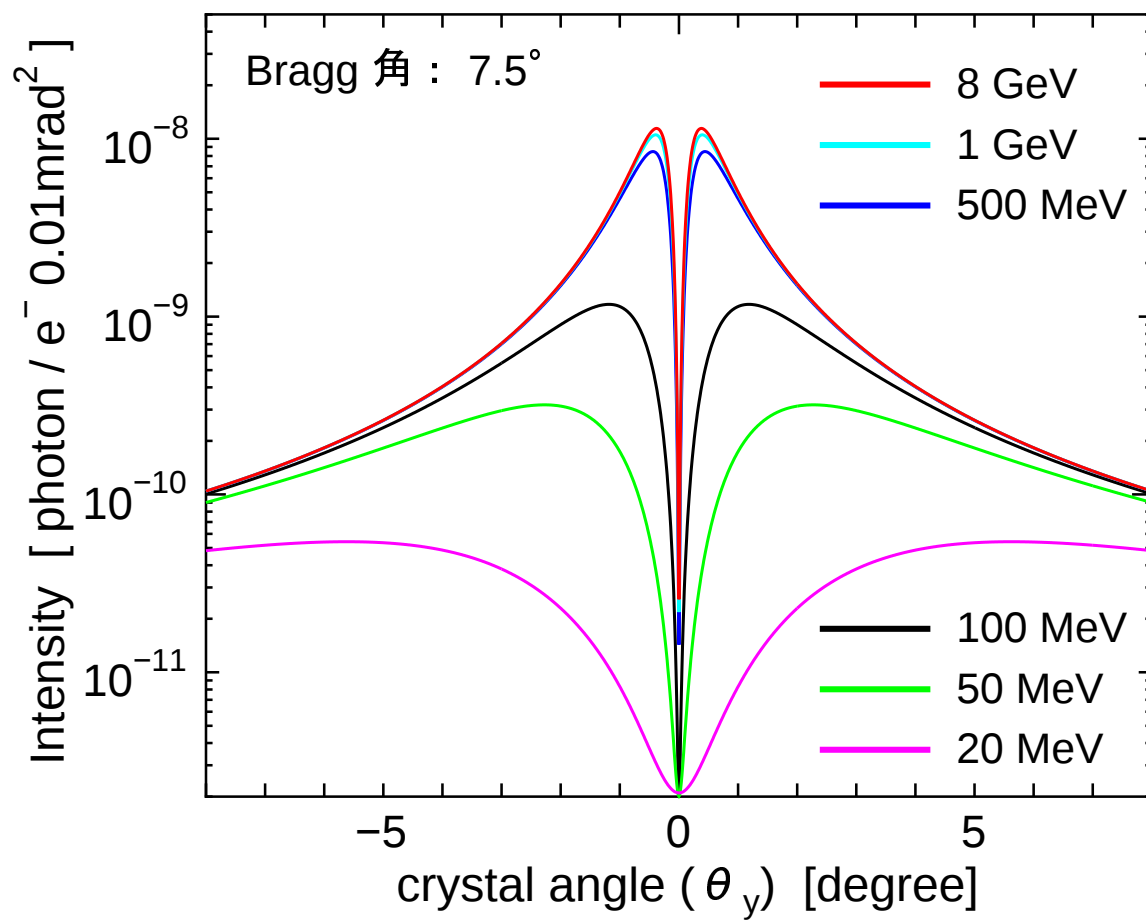


電子ビームエネルギー : 100 MeV

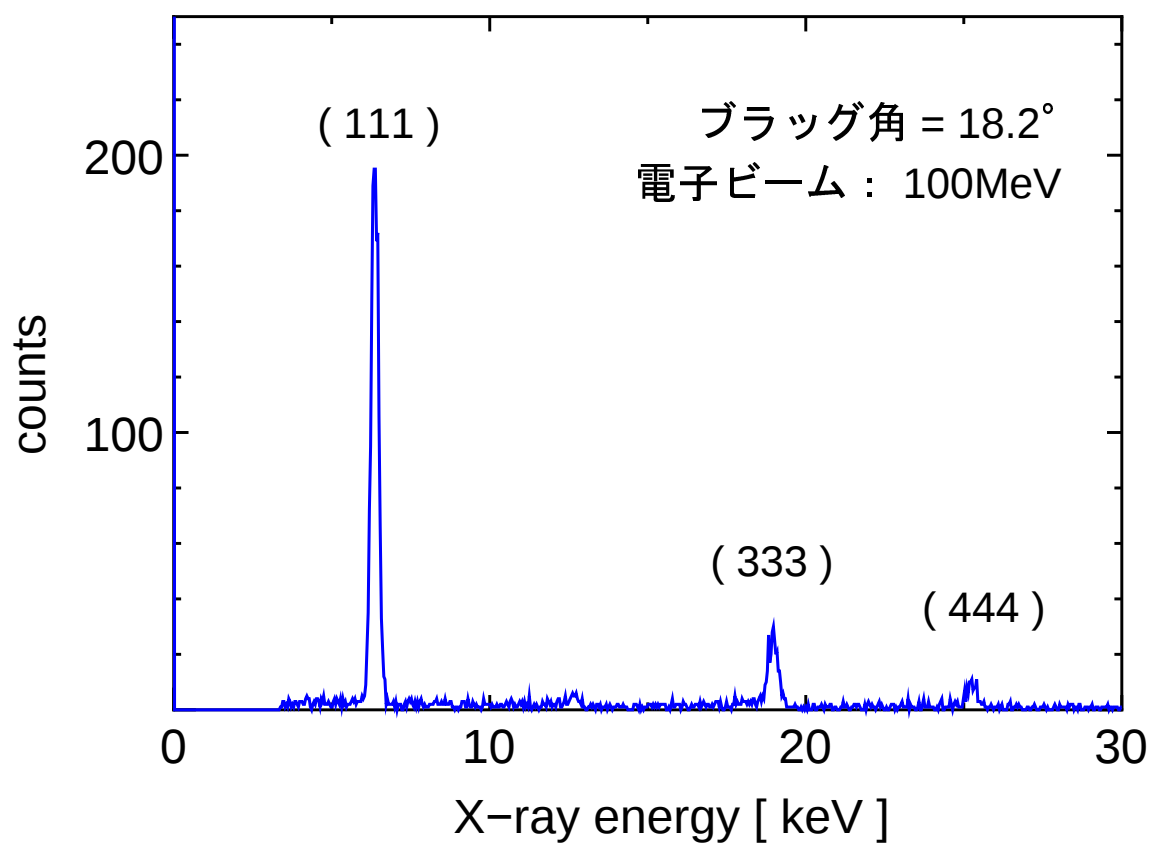
ブラッグ角 = 20°



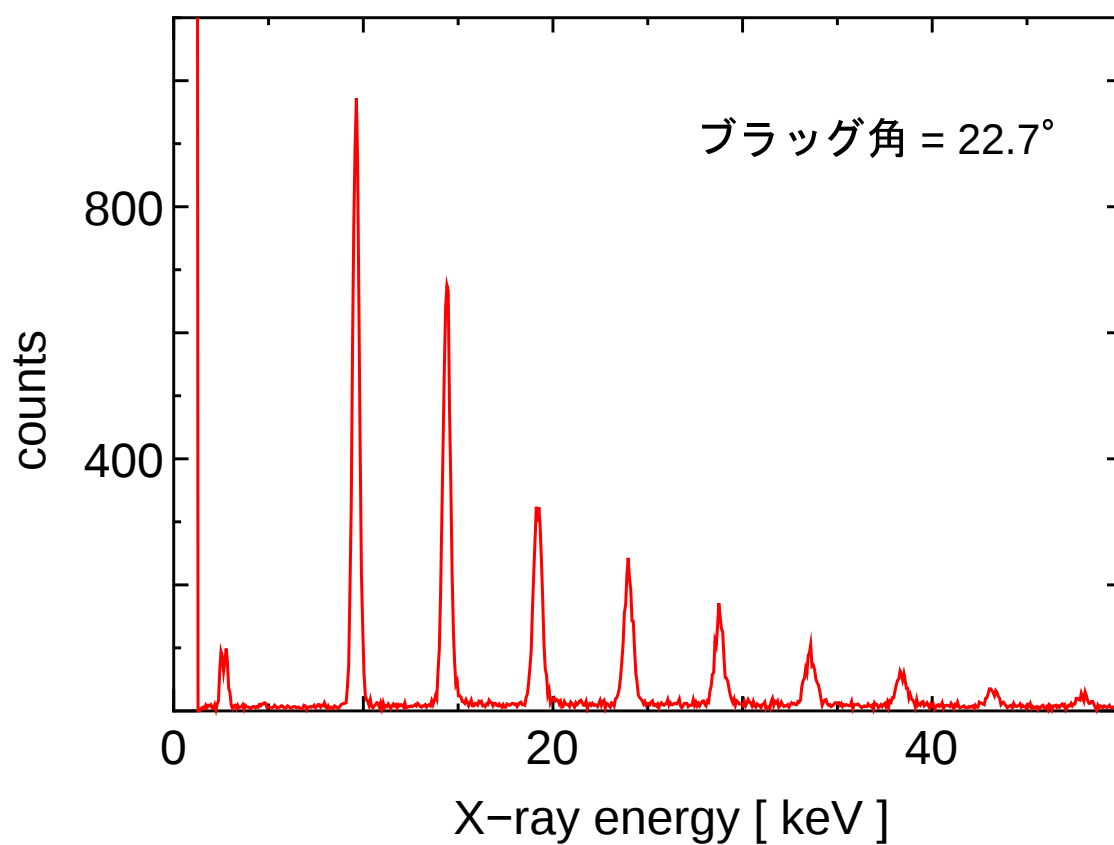
結晶：Si (111) 面 1mm 厚



Si 単結晶 (111)

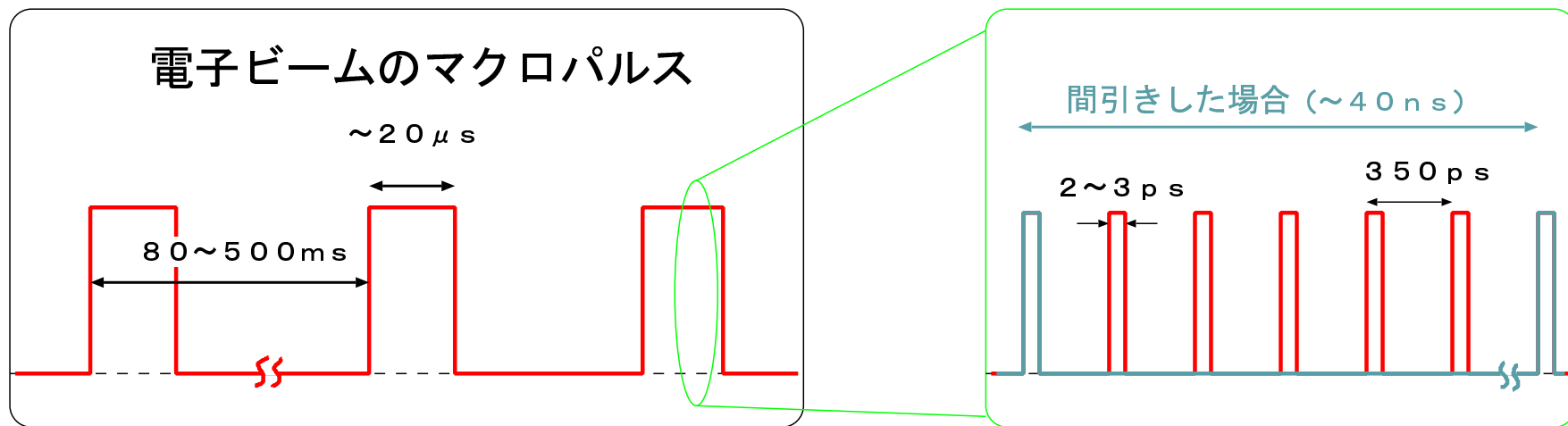


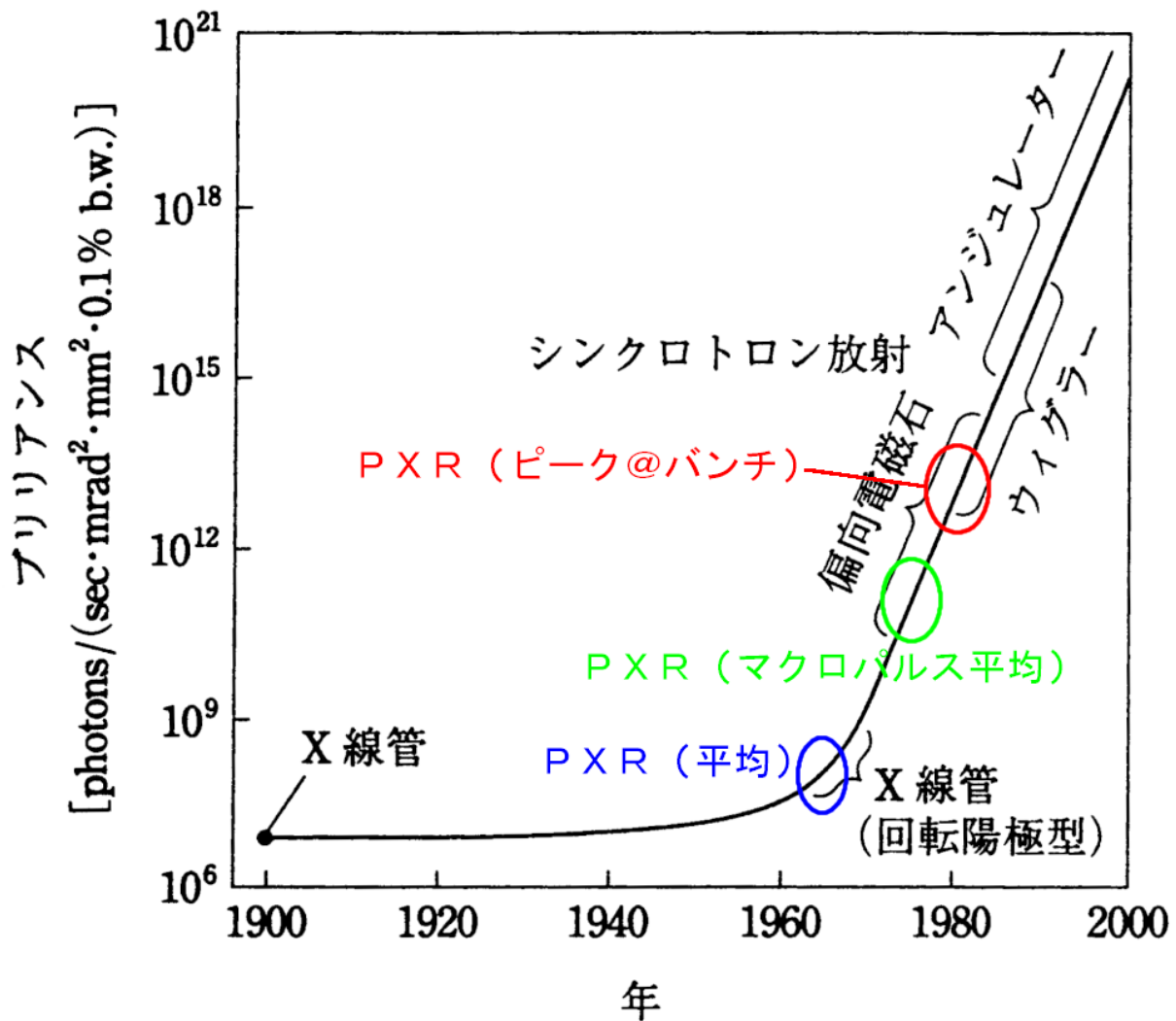
積層グラファイト (001)



PXRにリニアックを使う利点

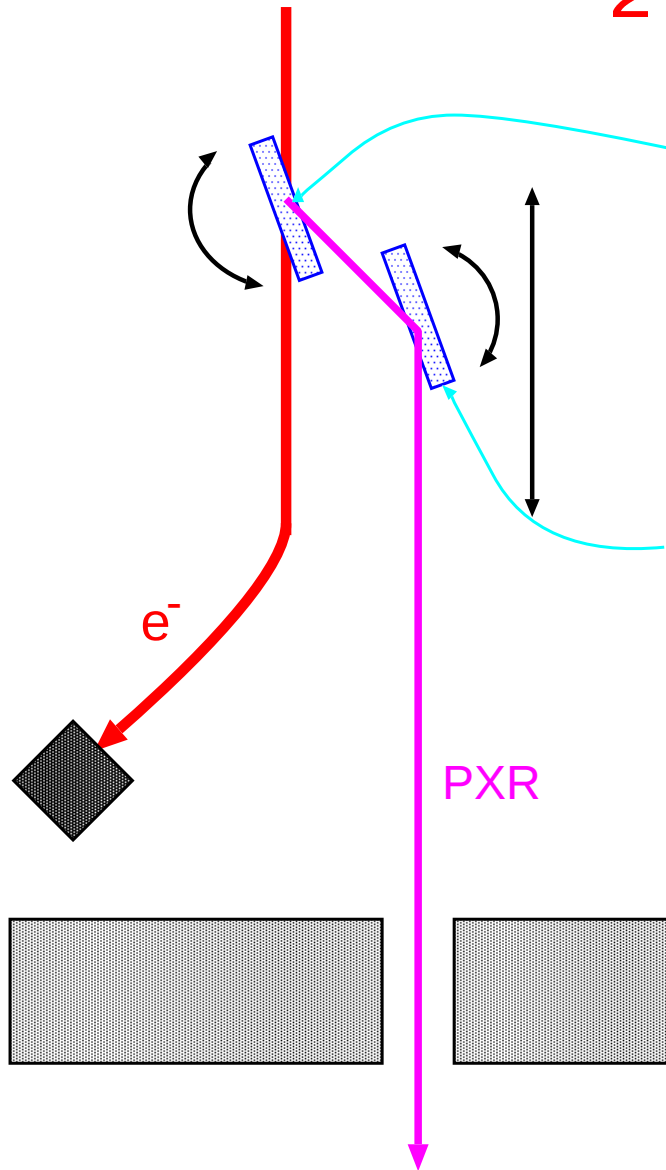
- ・ ターゲットによる電子ビーム破壊の影響がない
（リニアックはビーム使い捨て）
- ・ コンパクトな波長可変単色X線源として期待できる
- ・ ビーム電流のピーク値が非常に大きい → 強力なパルスX線源
（平均強度はあまり期待できない）
- ・ パルス性を利用した時間構造解析への応用が期待できる





X線源の輝度（ブリリアンス）の年代による向上.

2 結晶型 P X R 発生装置



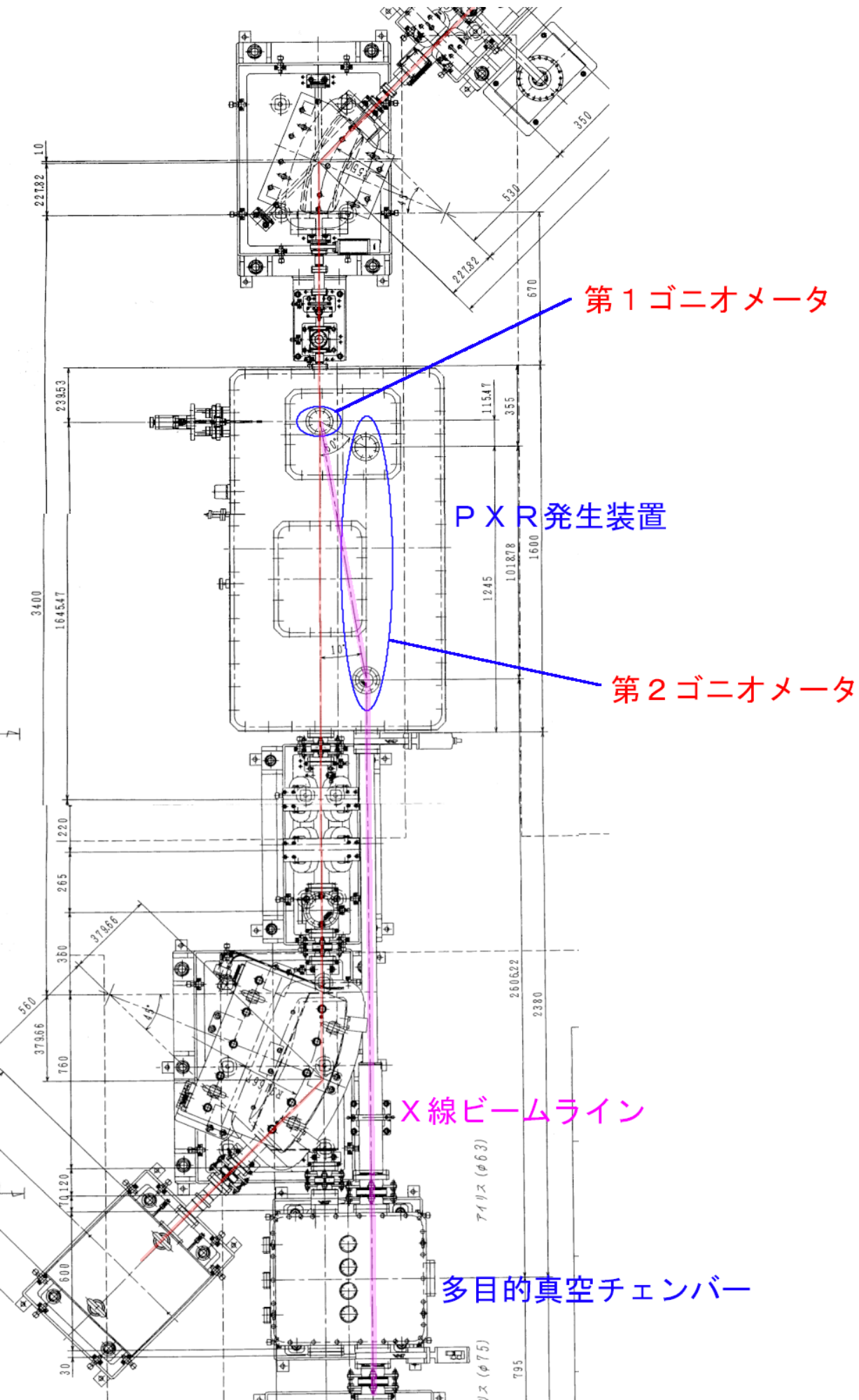
ターゲット結晶

発生するX線の波長を選択
電子ビームラインとX線の分離
(リニアックにおいては有用)

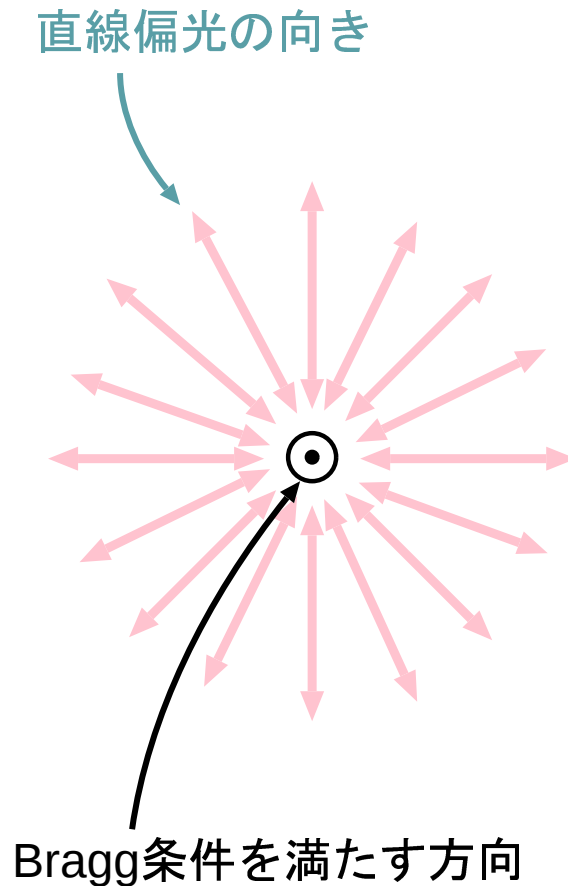
第2分光結晶

回転、並進移動が可能
全ての波長のX線で放出方向が同じ
(実用的なX線ビームラインとして必要)

結晶は熱負荷やコスト、品質を考慮すると
Si完全単結晶が現状では最適



得られるX線ビームの特徴



- X線ビームの形状

中抜の円錐状（断面はリング状）

第2結晶の角度によって形状変化

波長 → 長 ←→ リング幅 → 広

- X線の波長

波長は連続的に可変

水平方向に波長のグラデーション

波長分散は集光の仕方に強く依存

- パルス性

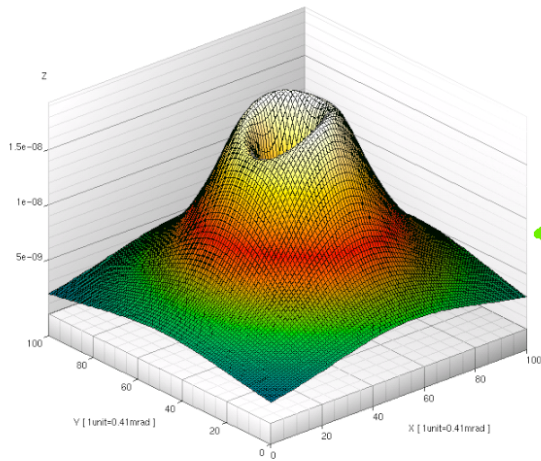
電子ビーム電流の構造を反映

- 偏光

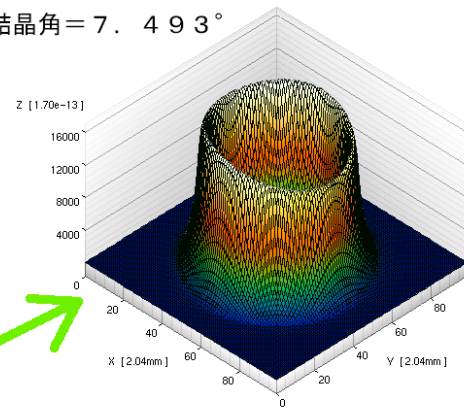
中心から動径方向に直線偏光

積分するとほぼゼロ（高ブラッグ角では偏り）

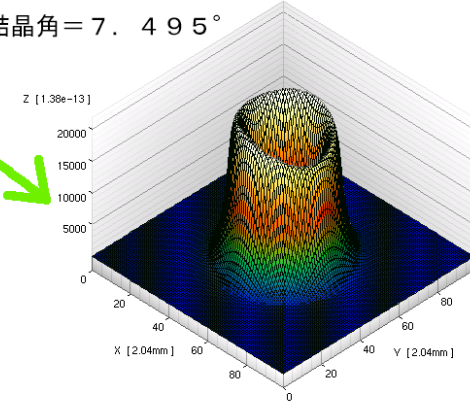
ブラッグ角 = 7.5°



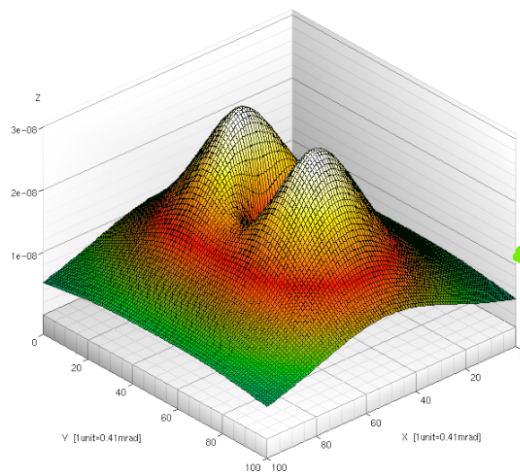
第2結晶角 = 7.493°



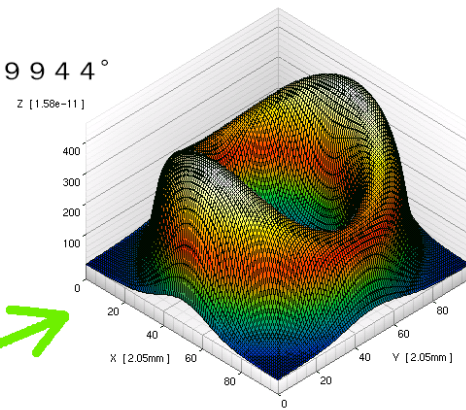
第2結晶角 = 7.495°



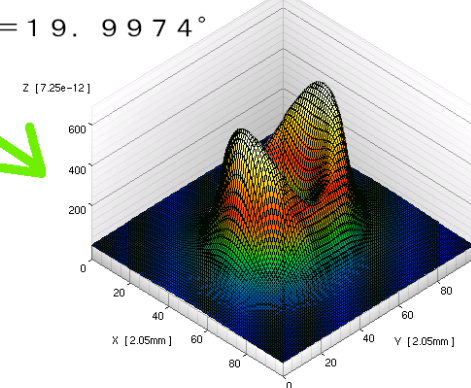
ブラッグ角 = 20°

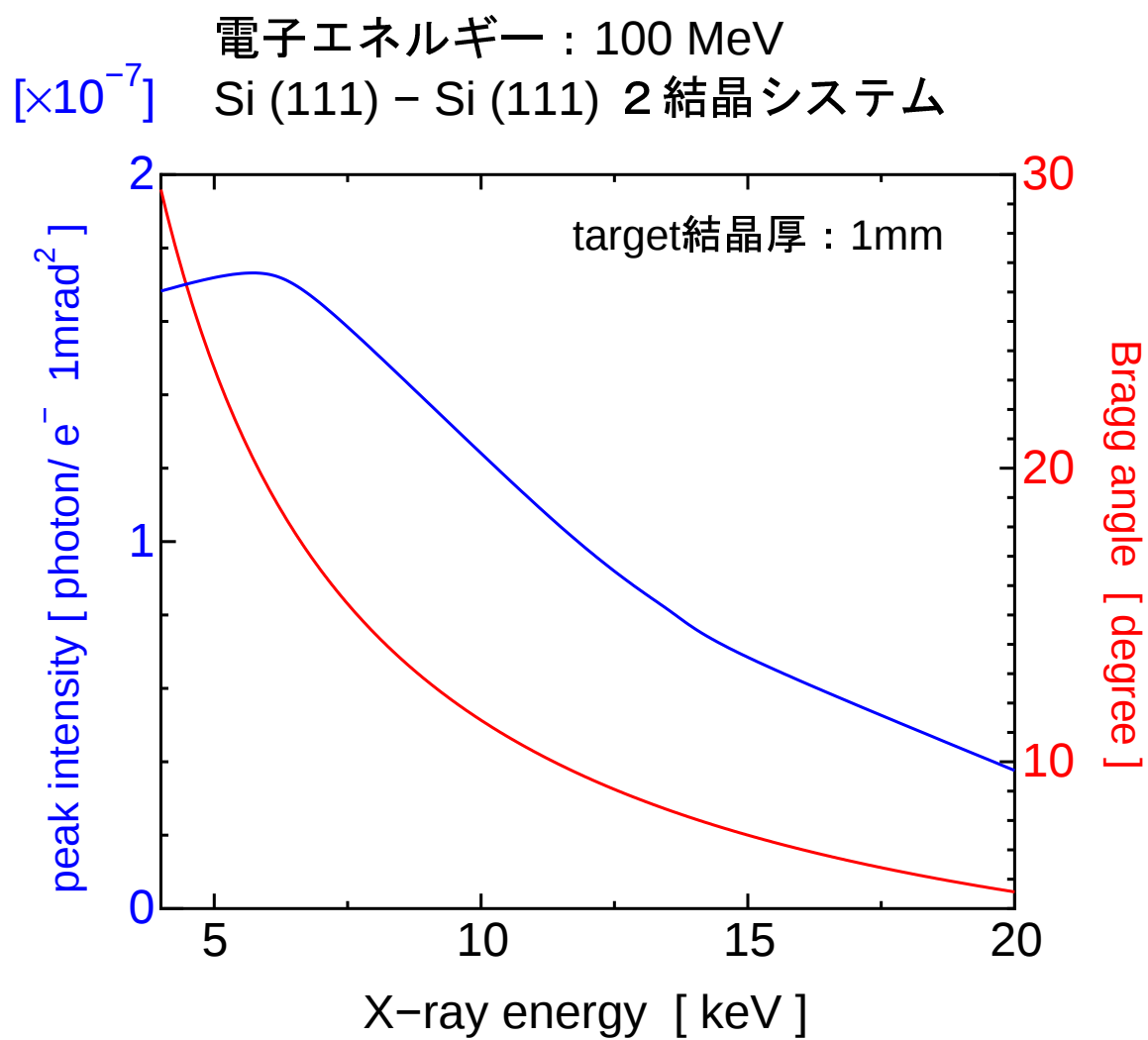


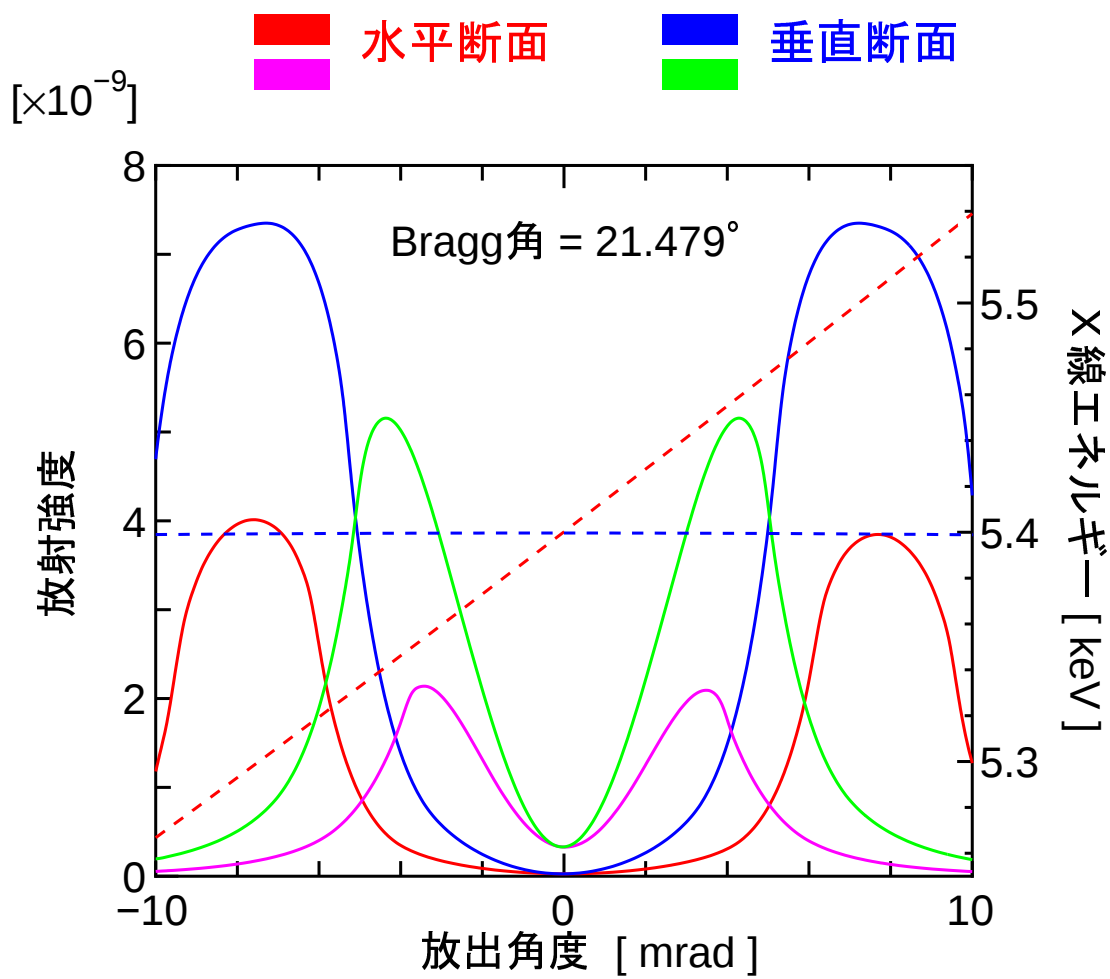
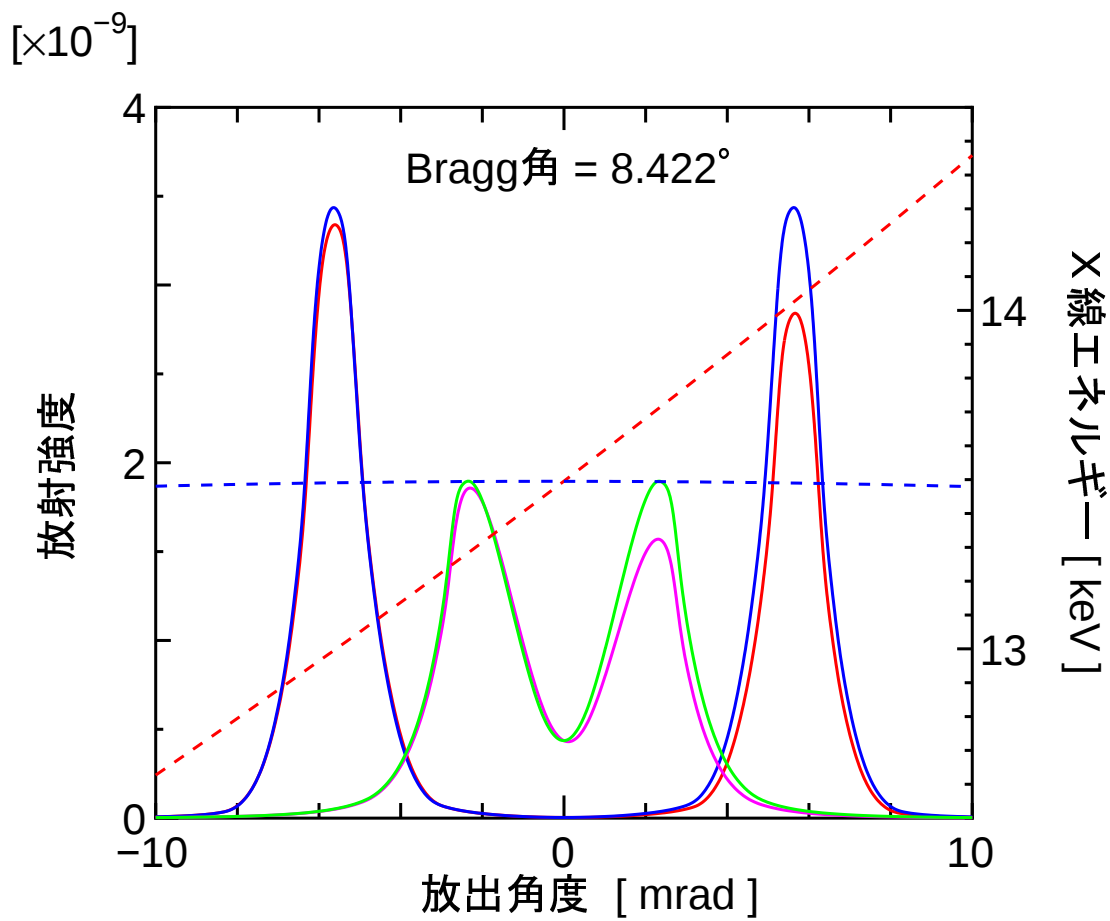
第2結晶角 = 19.9944°



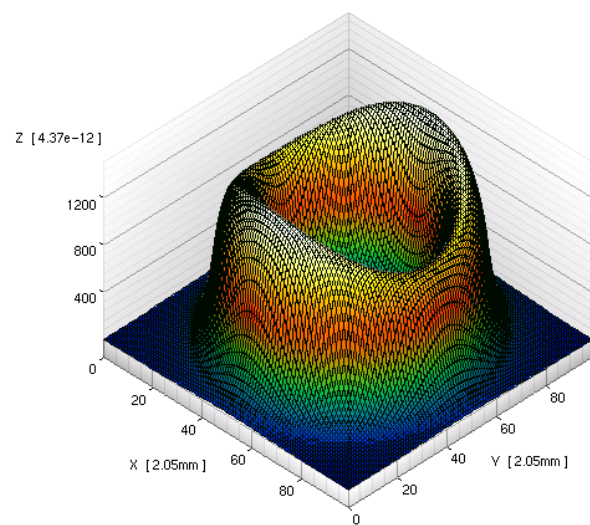
第2結晶角 = 19.9974°





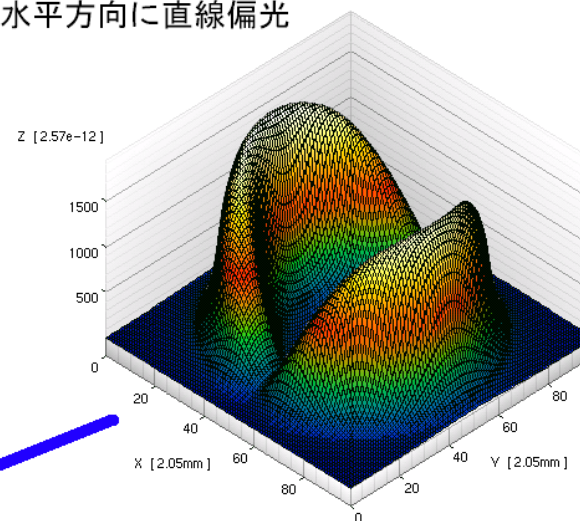


X線の放出方向によって直線偏光の分離が可能

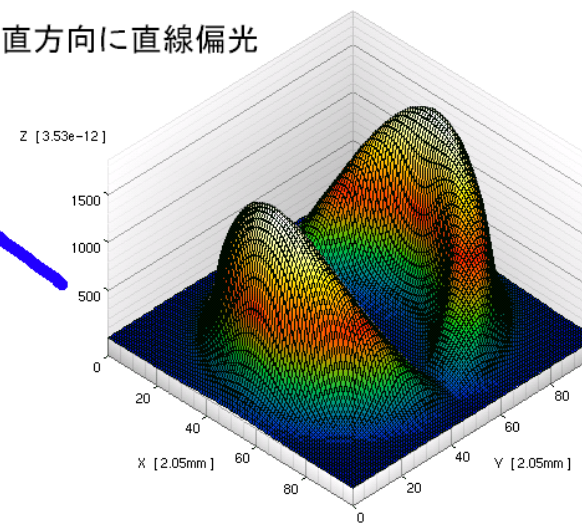


ブラッグ角 = 15°

水平方向に直線偏光



垂直方向に直線偏光



問題点と今後の展望

- ターゲット結晶の熱負荷

Si単結晶自体は熱的に非常に丈夫
パルスの負荷 → 熱膨張、温度因子への影響は未知数

- 電子ビームの発散の影響

ターゲット自身も発散の原因（～20mrad）
X線スポット形状、波長分散に影響

- 特殊な結晶駆動装置

制御システムのノウハウの蓄積が課題

- 放射強度

平均強度に関しては不利（リニアックの特性）

他のX線放射現象（遷移放射、レーザ逆コンプトン散乱）
との組み合わせによる強度の強化

パルス性の利用

- ナノ秒、ピコ秒領域でのX線測定技術の確立
- マクロパルスごと（80ms間隔）でのX線リアルタイムイメージング

→ 新しい測定手法の開拓