

2025年06月25日「地下稀事象」領域研究会@東京大学駒場キャンパス

NanoTerasuが地下稀事象の世界を照らす？

-放射光X線計測の活用の可能性-

東北大学 国際放射光イノベーション・スマート研究センター 吉田純也

- 鉱物を用いた宇宙線事象検出への可能性
- 放射光施設で生成したAxion Like Particlesの検出実験へ

研究歴：

- 宇宙線 μ ラジオグラフィ（浅間山・昭和山）
- ニュートリノ振動検証実験OPERA
- ダブルストレンジネス核実験 J-PARC E07
- 熱/冷中性子イメージング
- 3GeV高輝度放射光施設 NanoTerasu 立ち上げ

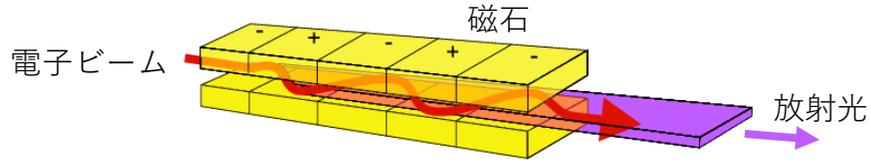
(c)Google



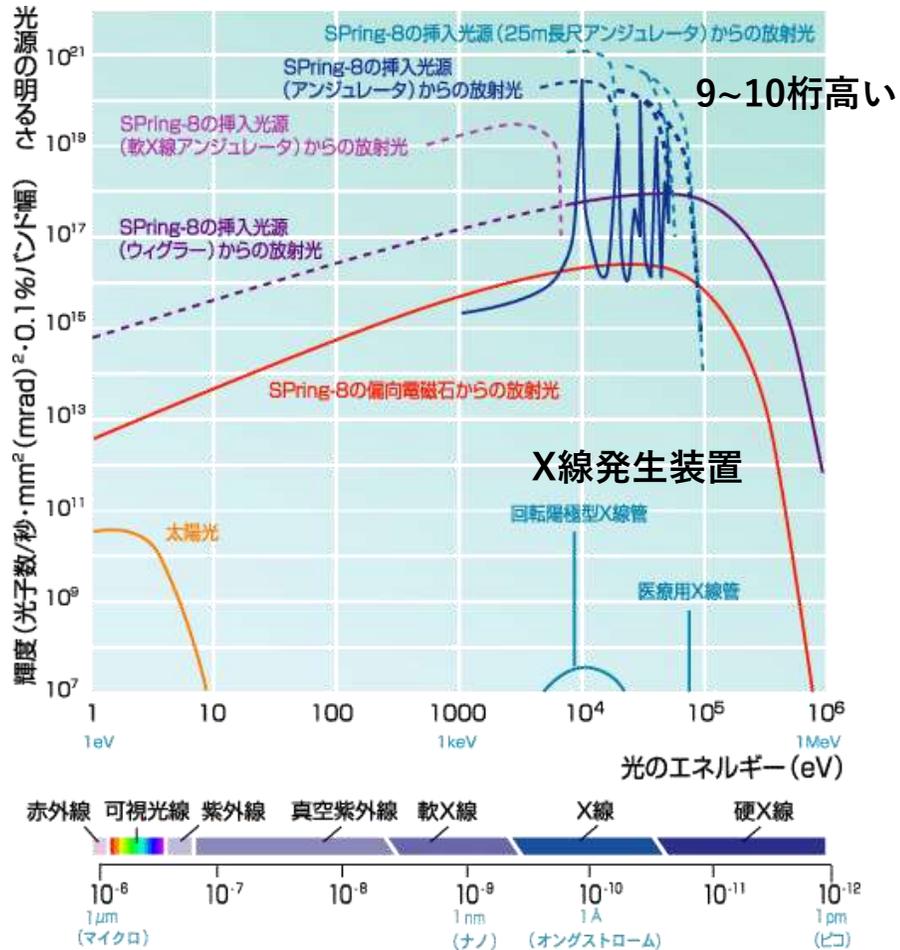
NanoTerasu

仙台駅

放射光：ほぼ光速の電子ビームを曲げた時に発生する電磁波(X線)



<http://pd.chem.ucl.ac.uk/pdnn/inst2/insert.htm>

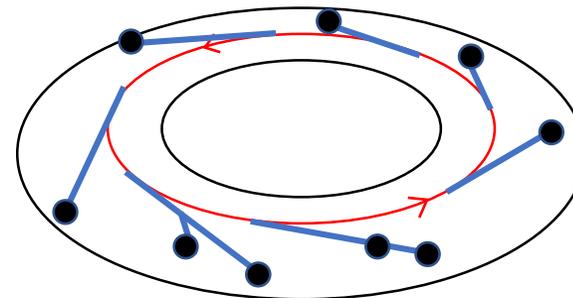


NanoTerasu

- 「官民地域パートナーシップ」によって東北大内に建設
- 3GeV低エミッタンス電子ビーム(~1.1nrad)で軟X線が強い
- 最大28ビームライン建設可能
 - 7本が2024年4月から、3本が2025年3月から運用
- 筆者は2022年5月から施設の立ち上げに参加し7BLsの計測システムを構築



<https://www.sris.tohoku.ac.jp/>

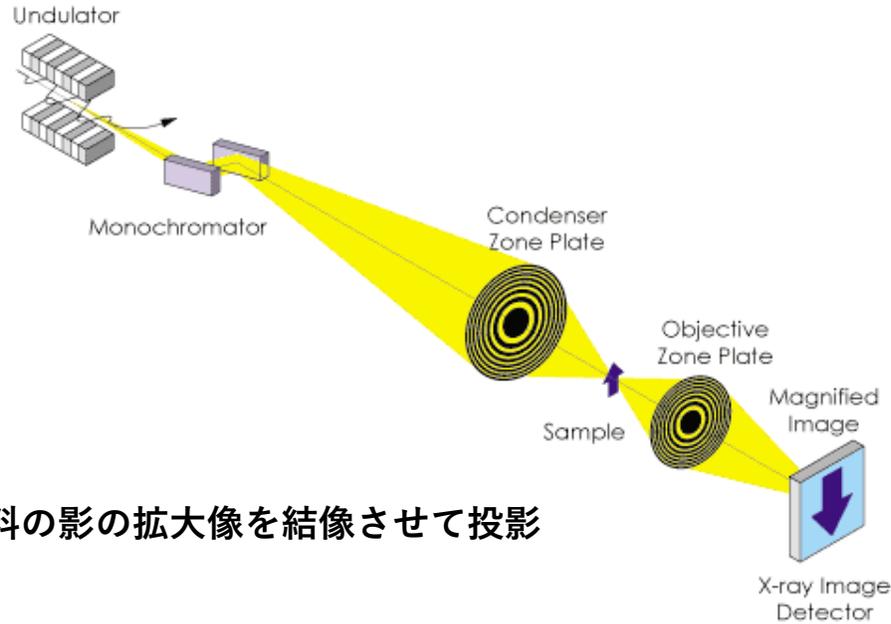


放射光施設の模式図

赤：電子蓄積リング
 青：ビームライン
 黒：測定装置

http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/whats_sp8/whats_sr/sp8_features/

結像型X線顕微鏡



https://www.sci.u-hyogo.ac.jp/material/x-ray_optics/kago/microscopy/xrm-j.html

見るのは	吸収による影
空間分解能	200nm ~ 100nm

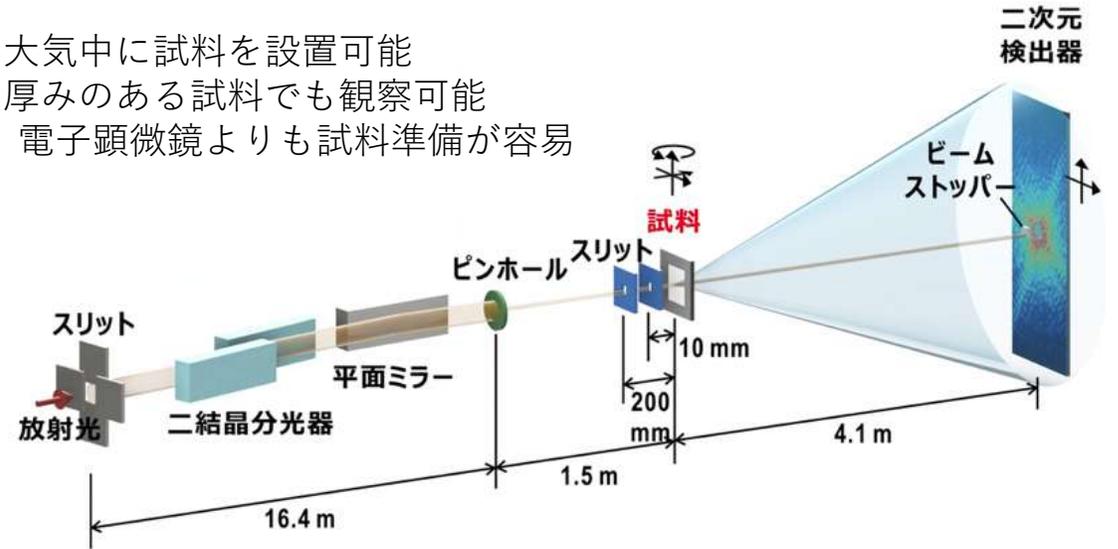
先行研究：X線顕微鏡を用いた原子核乾板読み出し

- 微粒子乳剤中のダークマター反跳飛跡検出に向け
T. Naka et al., Rev. Sci. Instrum. 86, 073701 (2015)
- 厚型乾板中のダブルハイパー核事象
A. Kasagi, ..., J.Yoshida et al., The European Physical Journal A, 58(10), Oct 1, 2022

ギリシャ語で「重なり」

X線タイコグラフィ (Ptychography)

- 大気中に試料を設置可能
 - 厚みのある試料でも観察可能
- 電子顕微鏡よりも試料準備が容易



http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2018/180629/

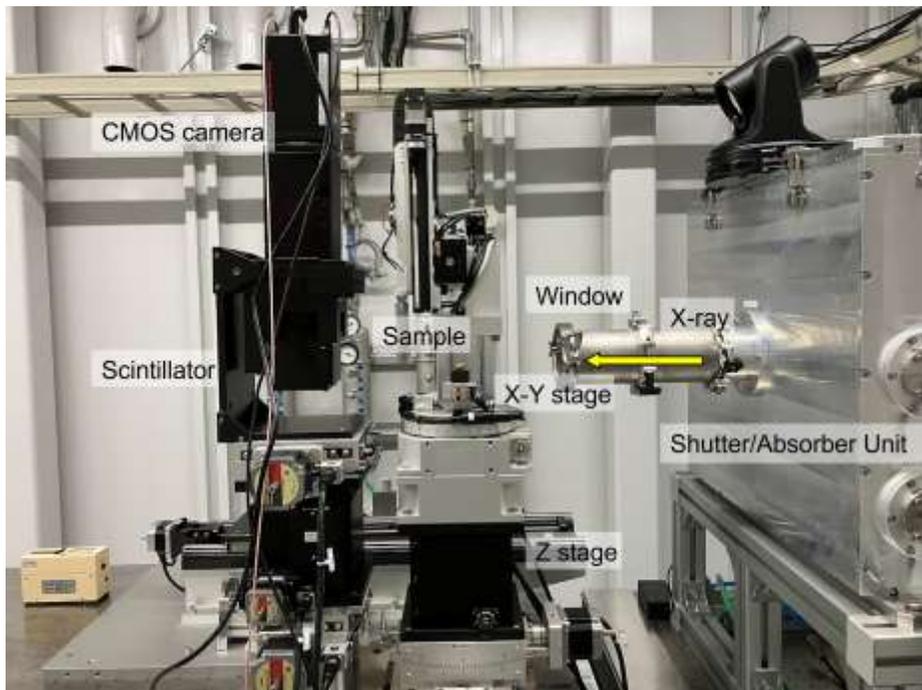
電子密度分布に因んだX線波動場の位相シフト
10nm ~ 数nmまで可能

原子核乾板読み出しを試験中

NanoTerasuBL10Uにて吉田 (2025)

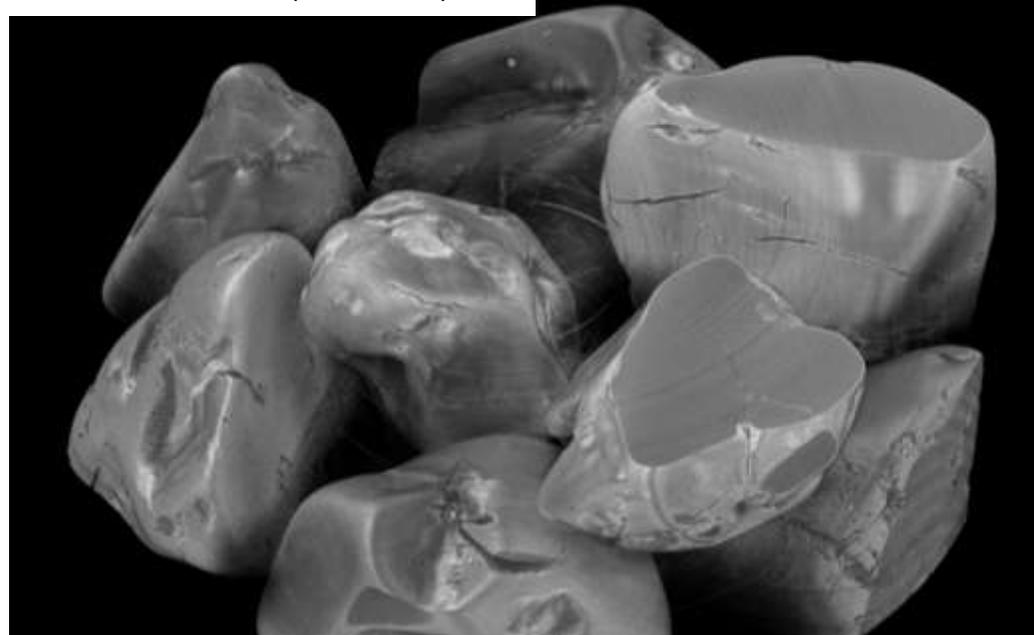
X線CT

<https://www.phosic.or.jp/informationBL09W.html>

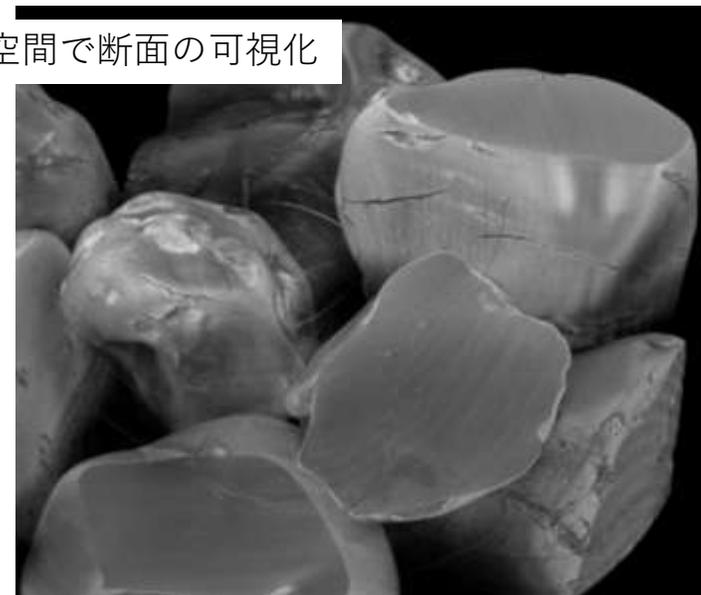


5min for data taking
10min for image processing
5min for sample changing

橄欖石(~5mm径の粒状)、1pix ~ = 5 μ m



デジタル空間で断面の可視化

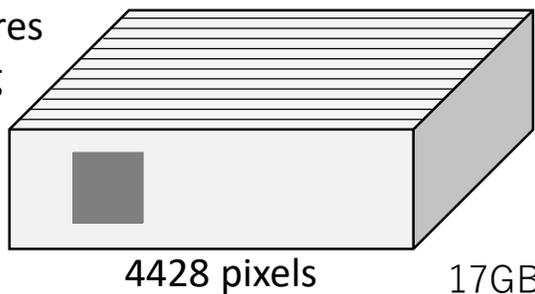


見るのは
空間分解能

吸収による影
10 μ m ~ サブ μ m

Projected Images

1800 pictures
For 180deg



3D data

4428 pixels

4428 pixels

1080 pixels

$4428 * 4428 \text{pix} * 32 \text{bit} * 1080 \text{picts} = 79 \text{GB}$

タイコグラフィで橄欖石中の空隙はどこまで検出可能か？

0.01 [rad] $\sim \lambda/500$

測定可能かどうかの目安：位相シフト $> 0.01 \text{ rad}$ かつ $I_{\text{trans}}/I_{\text{original}} > 10\%$

複素透過関数を決める物質の複素屈折率: $1 - \delta - i\beta$ ($\delta, \beta \geq 0$)として、

$$\delta = \left(\frac{r_e \lambda^2}{2\pi} \right) N_0 \rho \sum_i x_i (Z_i + f_i') / \sum_i x_i M_i \quad \text{位相シフトに寄与}$$

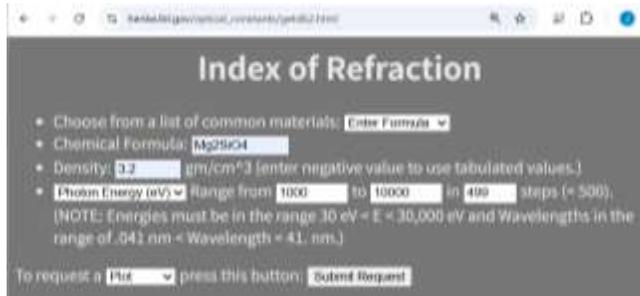
$$\beta = \left(\frac{r_e \lambda^2}{2\pi} \right) N_0 \rho \sum_i x_i f_i'' / \sum_i x_i M_i \quad \text{減衰に寄与}$$

https://www.jaima.or.jp/resource/jp/basic/pdf/basic_28.pdf

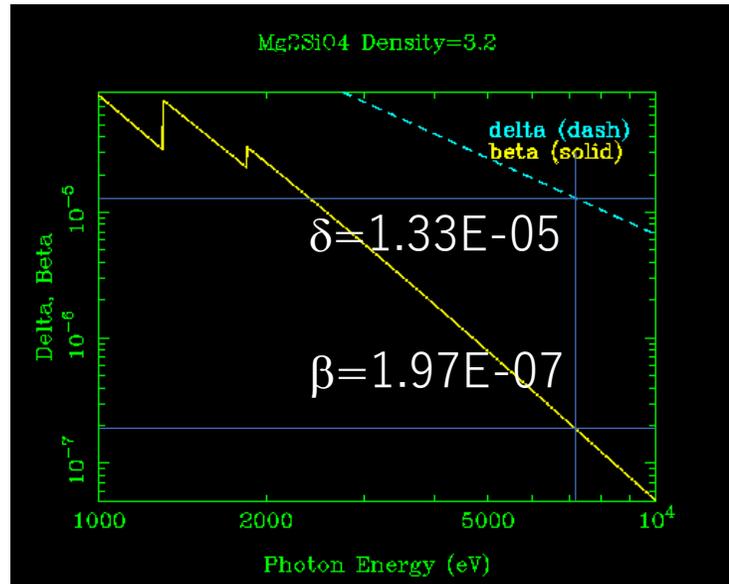
r_e : 古典電子半径
 N_0 : アボガドロ数
 λ : X線の波長
 ρ : 密度 (g/cm³)

i : i 番目の原子の…
 Z : 原子番号
 M : 原子量
 x : 原子数比 (モル比)
 f', f'' : 原子散乱因子 (異常分散項)

<https://www.cxro.lbl.gov/>を利用して素材の複素屈折率を計算。(↓グラフ & 鉄のK吸収端7.1keVの値を表示)



https://henke.lbl.gov/optical_constants/getdb2.html



位相シフト:
 $-2\pi\delta t/\lambda$ [rad]

この値が0.01以上になる t の値は？

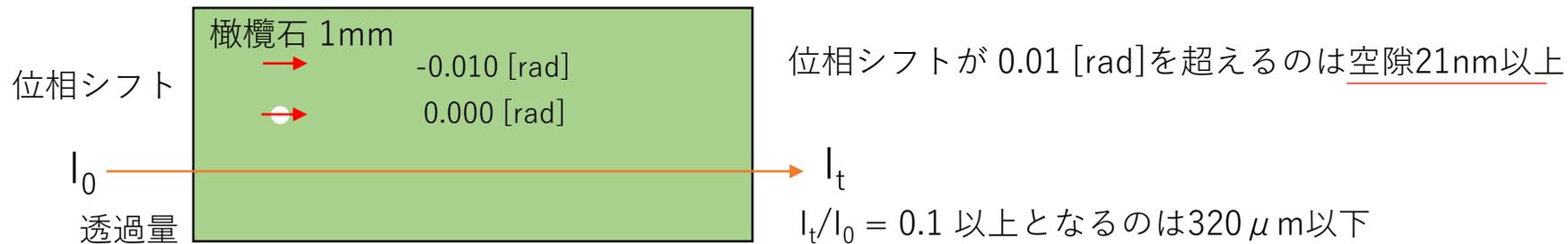
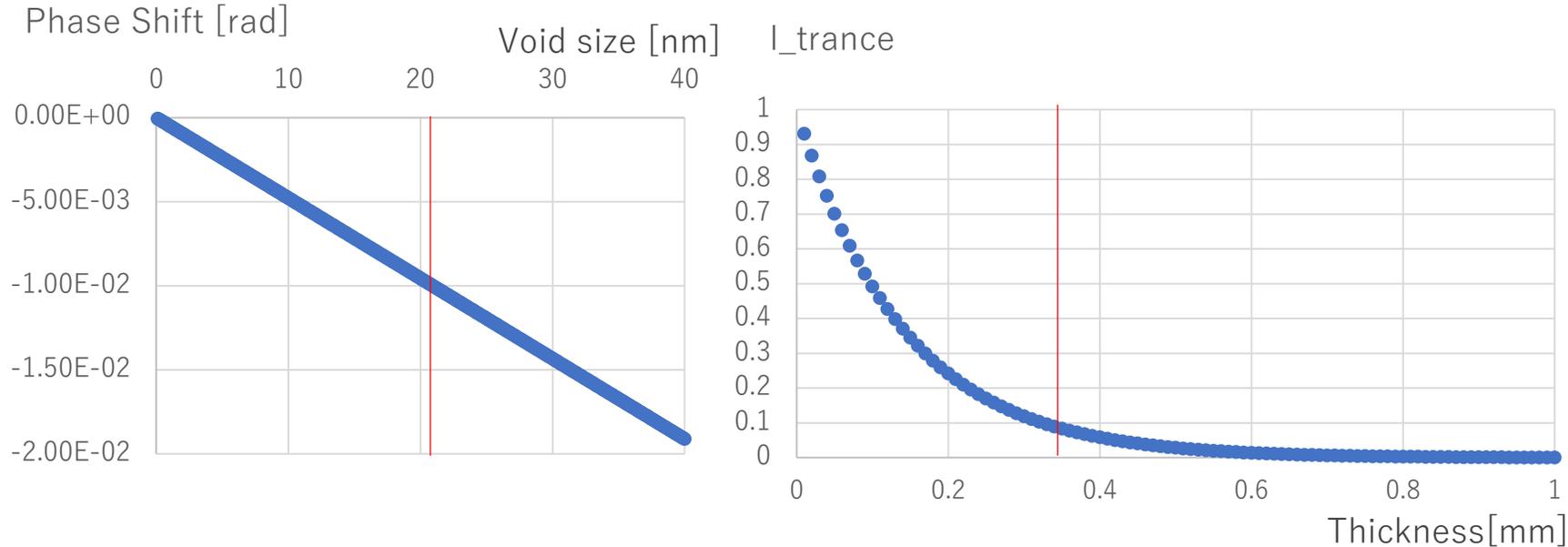
かつ

振幅の減衰率:
 $\exp(-2\pi\beta t/\lambda)$

この値が0.1以上になる t の値は？

どの程度の空隙まで検出可能？ どれほどの厚みまで透過する？ → 位相シフトと透過率を計算した

測定可能かどうかの目安：位相シフト > 0.01 rad かつ $I_{trans}/I_{original} > 10\%$



つまり、20nm以上の空隙が出来るならば、0.3mm厚程度に加工してスキャンすればよい。
 なお、スキャン時間は $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$ 四方で20分程度である。

その他の計測手法

X線光電子分光: XPS
 X-ray Photoelectron Spectroscopy

物質の原子の電子の束縛エネルギーの測定 → 特に表面数nmの元素組成・その化学状態

硬X線光電子分光: HAXPES

表面100nm程度の化学状態

X線磁気円二色性: XMCD

X-ray magnetic circular dichroism
 磁性体のサブ μ スケールの磁区構造の可視化

X線回折: XRD

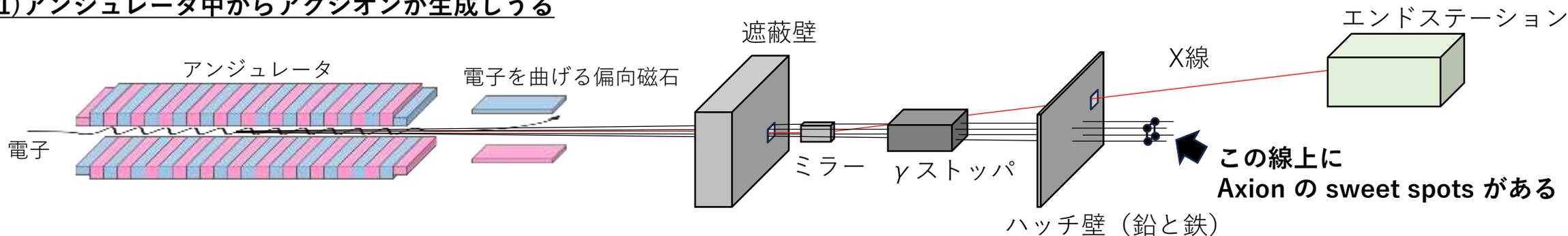
X-ray diffraction
 ラウエ斑点、デバイシェラー環による結晶構造解析

X線吸収微細構造: XAFS

X-ray Absorption Fine Structure
 特定の元素の化学状態の解析

放射光施設では勝手にアクシオンが生成されていると着想した

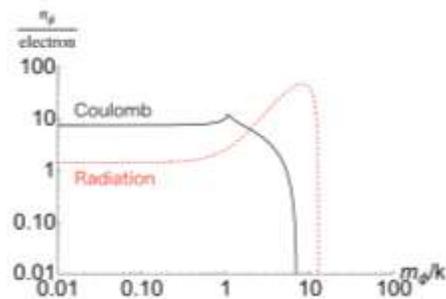
(1) アンジュレータ中からアクシオンが生成しうる



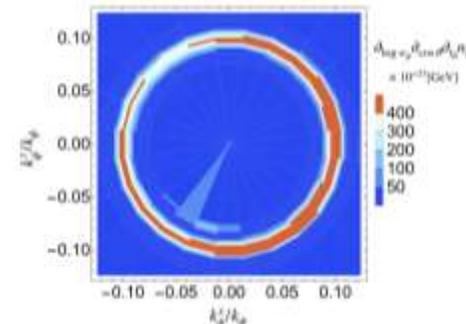
- 「場の量子論：Quantum Field Theory」で計算
- Axionの質量と結合定数を仮定した時の、生成量と放出角を計算した



DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.111.036020>



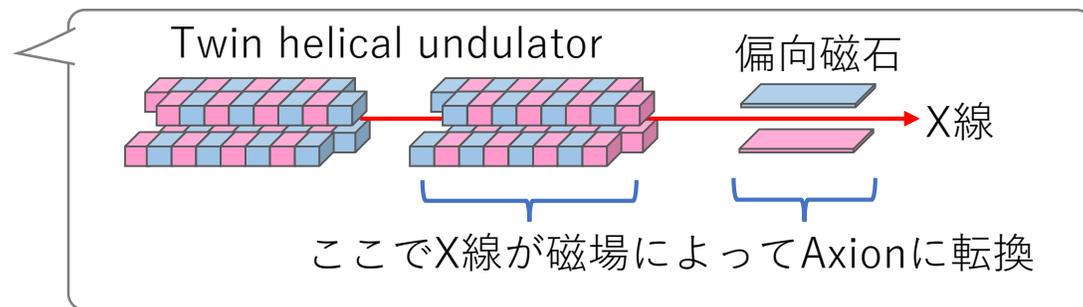
2プロセスがあり、片方はレゾナンス的



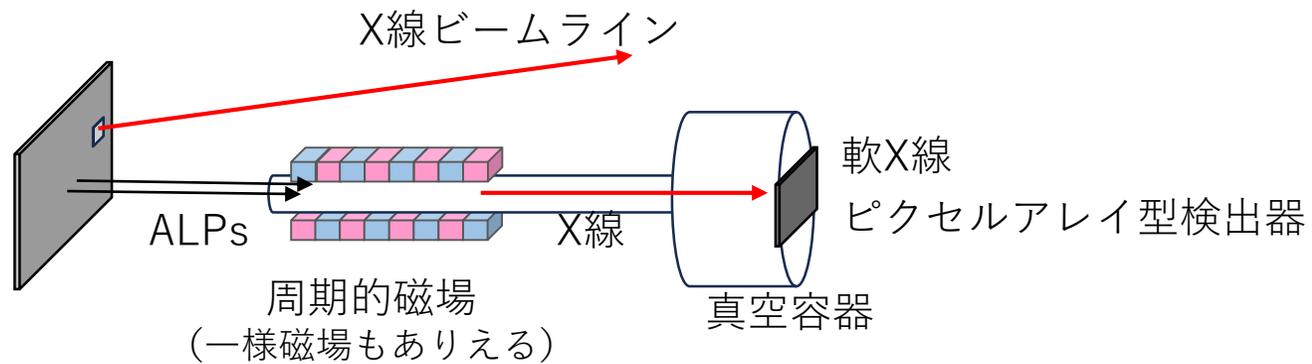
軸から一定角度離れた方向に放出する

(2) アンジュレータ・偏向磁石の組み合わせで生成しうる (論文執筆中)

- Twin helical undulator や偏向磁石を光子が通過する際に発生
- この過程の場合、偏光方向と磁場方向が平行であるべし



実験ホールに設置するALPsの検出部



学内に同様の装置があると聞いたので取材した

