

X線自由電子レーザー施設SACLAに おける真空複屈折の探索

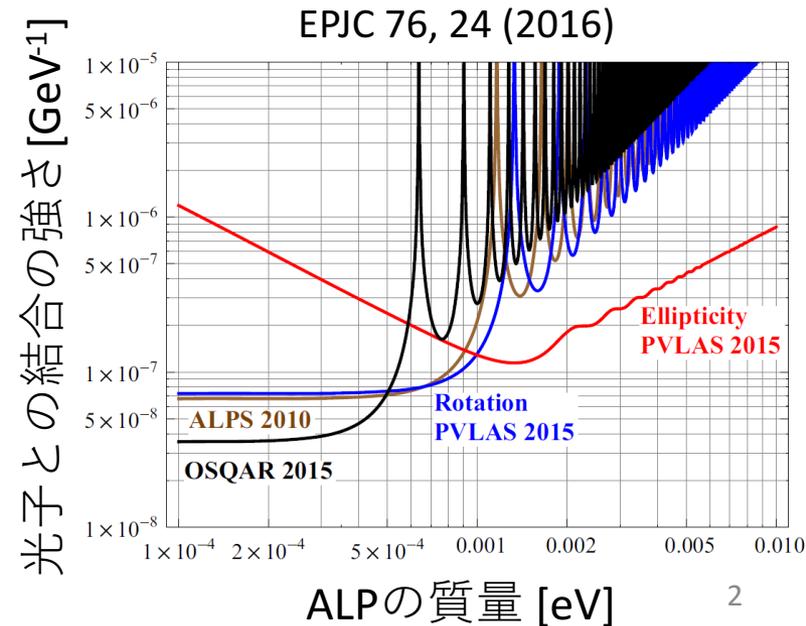
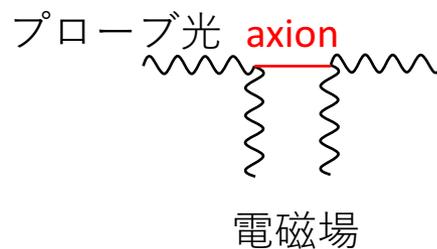
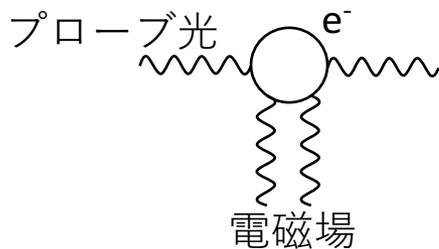
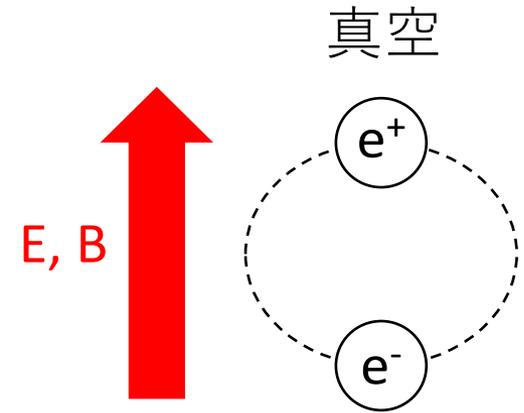
山崎高幸, 清野結大^A, 稲田聡明, 難波俊雄, 浅井祥仁^A,
籾内俊毅^B, 富樫格^{B,C}, 犬伏雄一^{B,C}, 大和田成起^B,
玉作賢治^B, 矢橋牧名^{B,C}, 石川哲也^B

東大素セ, 東大理^A, 理研/SPring-8/SACLA^B, JASRI/XFEL^C

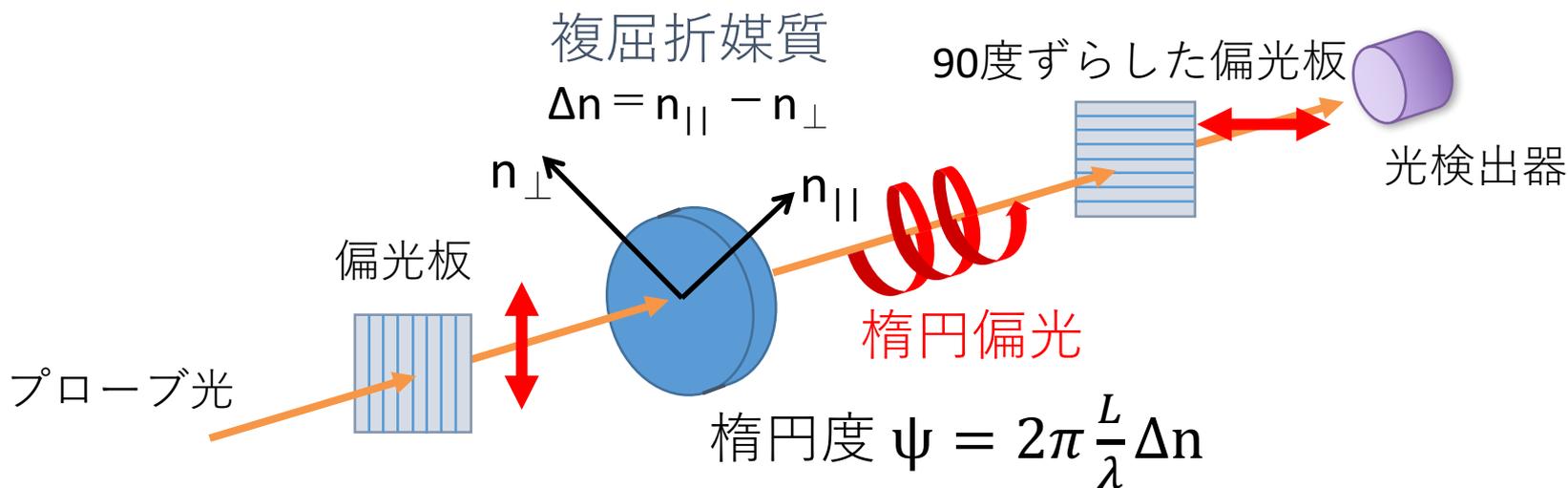


真空複屈折の物理

- 真空は仮想的な粒子の生成・消滅を繰り返している。この仮想的な粒子対に対して電磁場を印加すると真空が分極・磁化し、真空が異方性（方向による屈折率の違い）を持つ→真空複屈折
- 1990年代から複数の実験グループ（PVLAS, BMV, etc.）が観測を試みているが未観測。理論値の約20倍である $k_{CM} < 8 \times 10^{-23} [T^{-2}]$ 95% C.L. まで到達
- 軽い未知粒子が存在するとQED理論値より複屈折が大きくなるため、未知粒子探索という側面もある



真空複屈折の探索手法



- 従来の実験では数Tの磁石を用いて真空複屈折を生じさせていたが、磁場 B [T]に対し真空複屈折は $\Delta n = k_{CM} B^2$ ($k_{CM} = 4 \times 10^{-24} [T^{-2}]$) と極めて小さい

われわれはPWクラスのレーザーを $1\mu m$ に集光した $I = 10^{22} W/cm^2$ の電磁場（磁場にして $10^6 T$ ）を用いることで $\Delta n = 10^{-11}$ の真空複屈折を引き起こして実験を行う

500TWレーザー@SACLA

- 現在、SACLAで**500TW**のレーザー（X線ではなく**800nm**）2台のインストールが進められている。2016年中に完了予定
- これはもともと、いわゆるポンプ・プローブ実験において物質を励起させるポンプ光（X線がプローブ光）として利用されるレーザー。我々はこれで**物質ではなく「真空」を励起**する
- 500TWレーザーを**1 μ m**まで集光するとインテンシティは **$I=10^{22}$ W/cm²**に達する（世界最高レベル）。これは **$B=10^6$ T**の磁場に相当し、 **$\Delta n=10^{-11}$** の真空複屈折が引き起こされる



	THALES 500TW x2
波長	800 nm
パルスエネルギー	12.5 J x2
パルス幅	25 fs
繰り返しレート	1 Hz

プローブ光 = SACLA

- SACLA

- X線自由電子レーザー
- パルスあたりの光子数
 $\sim 4 \times 10^{11}$ photons/pulse
- パルス幅 < 10 fs
- 繰り返しレート 30 Hz

- プローブ光にX線を用いる利点は2つ

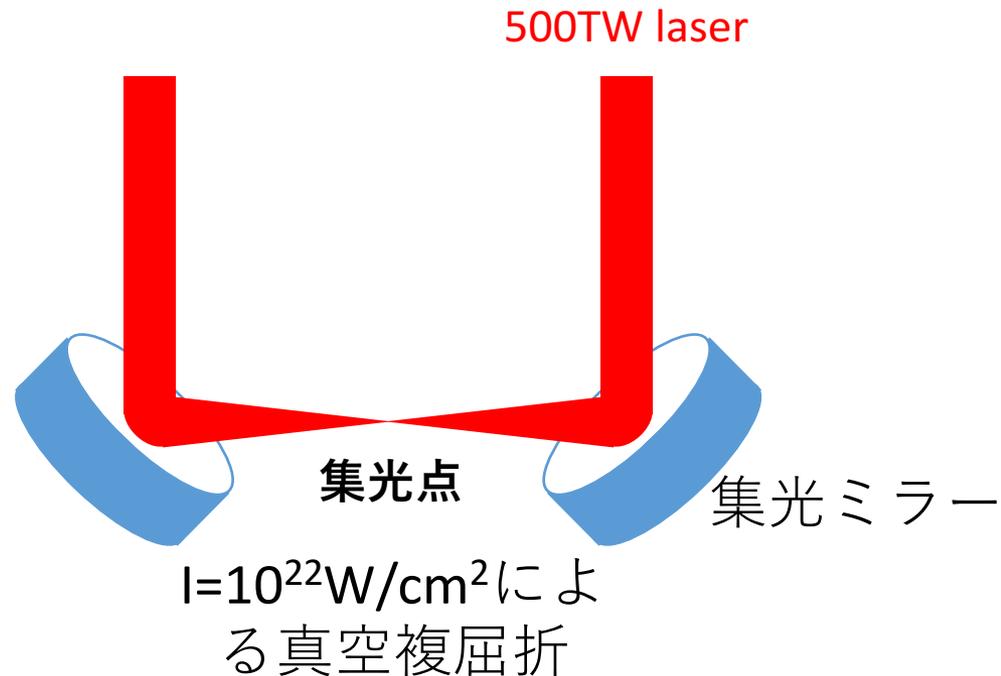
1. 測定量である楕円度 $\psi = 2\pi\Delta nL/\lambda$ は、プローブ光の波長 λ に反比例
→ 可視光に比べて4桁よい
2. X線領域での偏光子はブリュースター角での多重反射を利用したもので、過去に消光比 $\delta_0 = T_\pi/T_\sigma = O(10^{-10})$ が達成されている c.f. B. Marx et.al., PRL 110, 254801 (2013) → 可視光領域では消光比 $\delta_0 = O(10^{-6})$ なのでこれも4桁よい



<http://commune.spring8.or.jp/imageterms/img/img01.jpg>

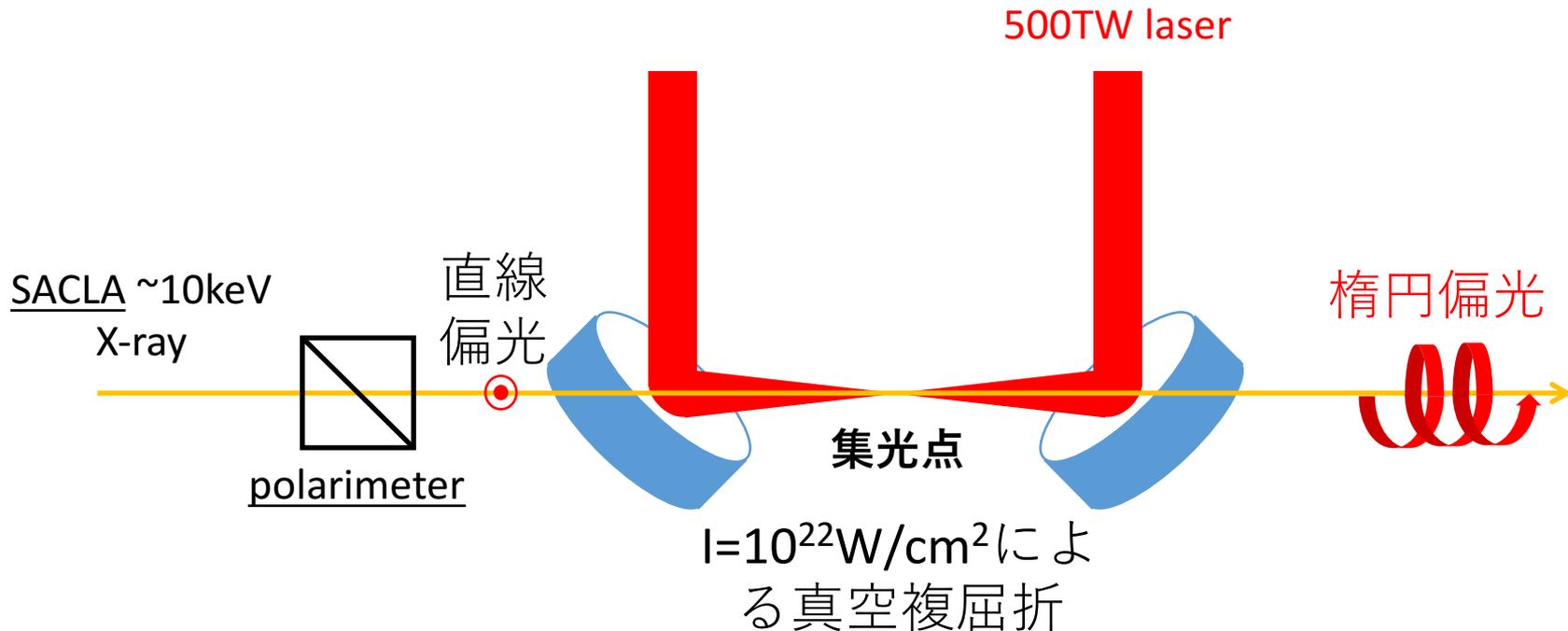
実験セットアップ

- 500TWの光学レーザーを回折限界の $1\mu\text{m}$ まで集光することで高強度場を発生させ、真空複屈折を生じさせる



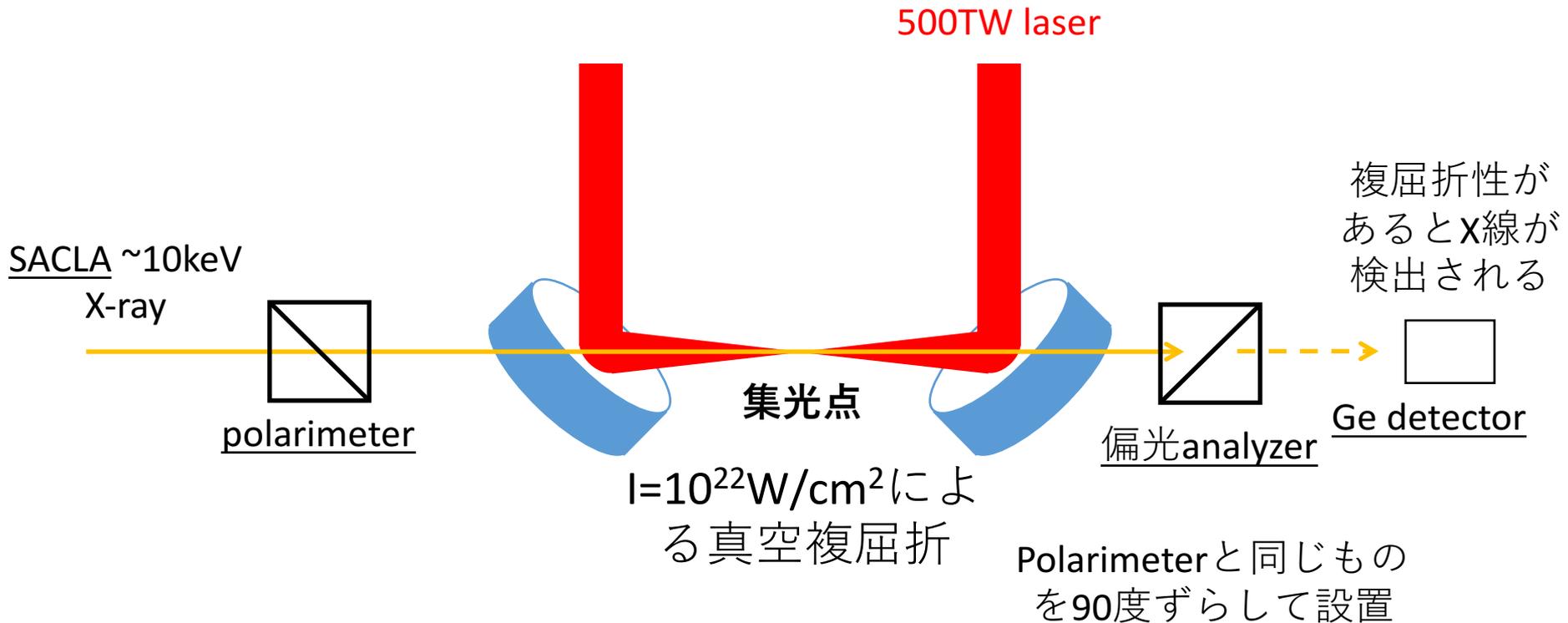
実験セットアップ

- 複屈折性を持つ真空中にSACLA（X線プローブ）を通すと直線偏光が楕円偏光に変わる



実験セットアップ

- 楕円度をX線偏光子を用いて測定する

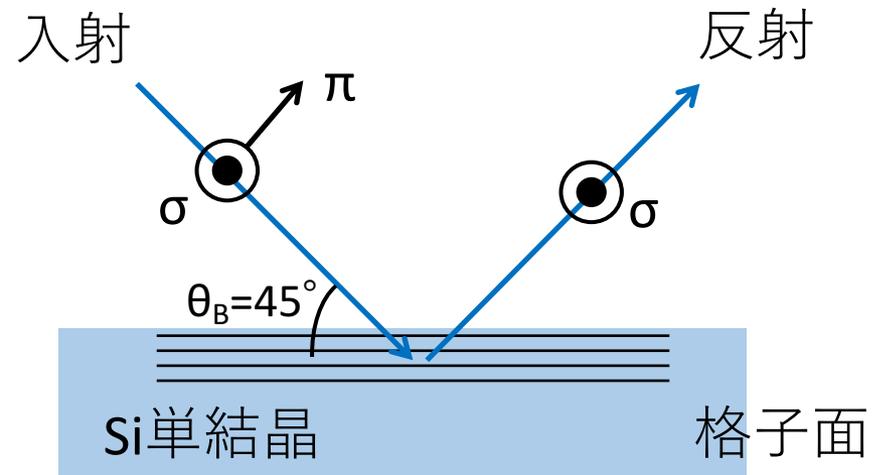
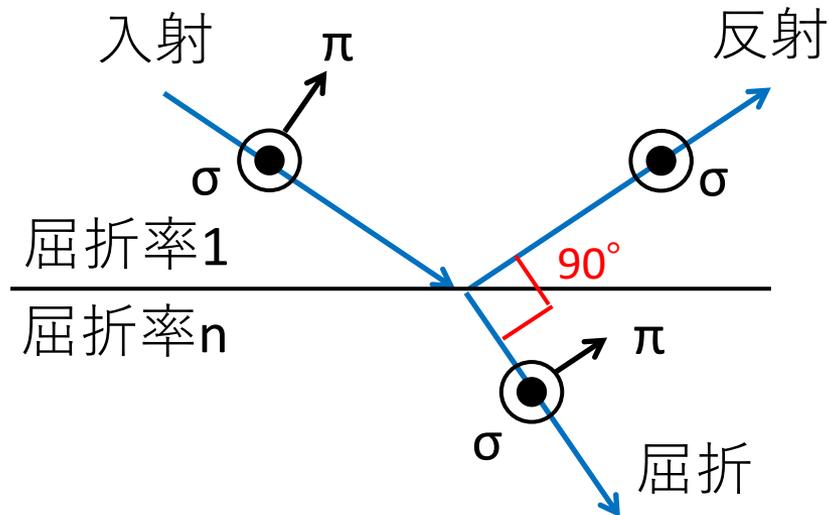


予想感度

- 以下のパラメタを仮定すると、
 - X線レーザー： 5×10^{11} photons/pulse, Beレンズで $3 \mu\text{m}$ 集光, シード化により単色化されたバンド幅 1eV
 - 800nmレーザー：500TW (1Hz) $1 \mu\text{m}$ 集光
 - タイミングジッター—300fs (FWHM)
 - 偏光子の消光比 $\delta = 10^{-10}$ (detuneすることでOBG測定が可能)
 - Ge検出器の検出効率 $\eta = 85\%$ @8.3878keV
 - 動的振り分けにより30日のビームタイムでの測定感度は $k_{\text{CM}} < 5 \times 10^{-22} [\text{T}^{-2}]$ 95% C.L. でPVLASより5倍悪いが、この手法での測定は世界初であり、OBGでのクリーンな測定が可能
- 現在、新たに偏光子（感度は消光比 δ の1/2乗に比例）の開発を進めており、本講演で現状を報告する

X線偏光子の設計

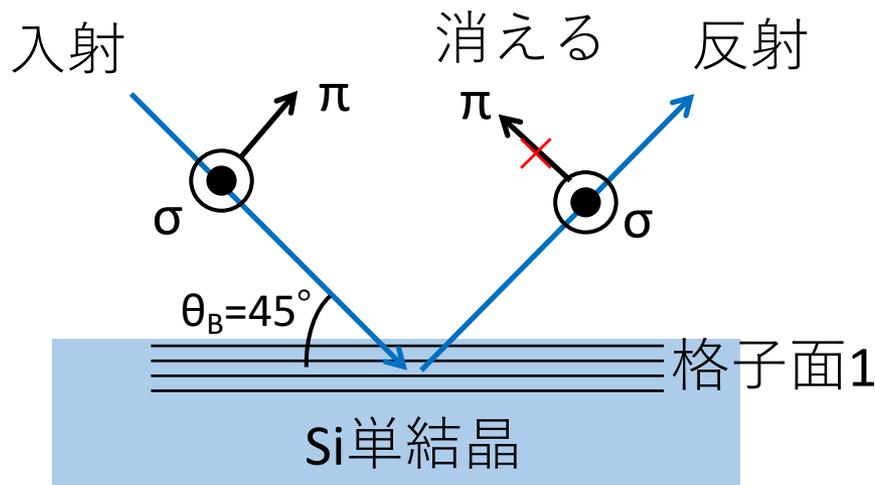
- 我々の実験に適したエネルギーのX線に対してなるべく小さな消光比を持つX線偏光子を新たに設計・製作した
- 基本原理は、**ブリュースター角 ($\tan\theta=1/n$, n は屈折率)**で**反射させることで π 偏光を殺す**というもの。X線に対する屈折率はほぼ1なので $\theta_B=45$ 度になる。大角度反射なのでSi単結晶で $\theta_B=45$ 度のBragg回折をさせる



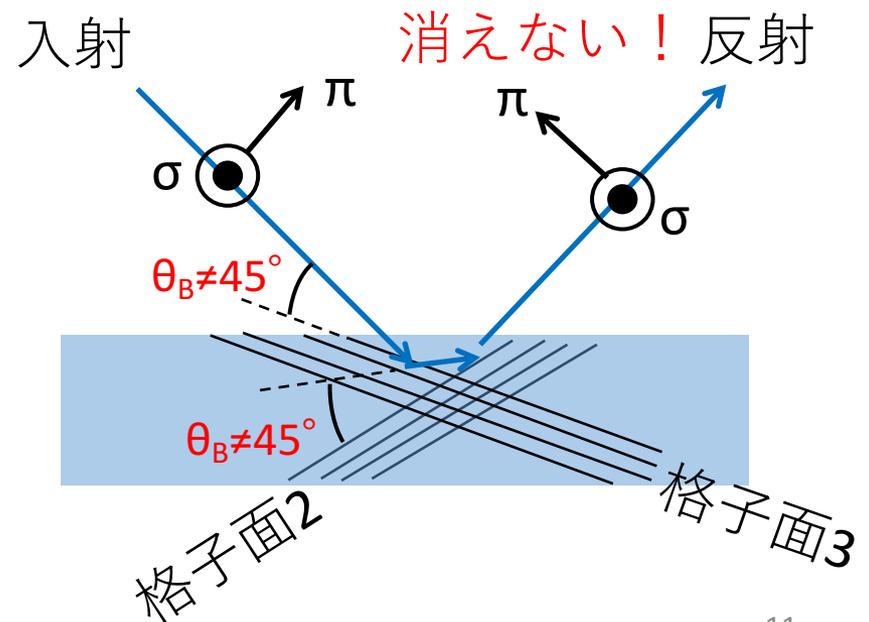
消光比を悪化させるもの

- 1回反射だけを考えた場合、 $\theta_B=45^\circ$ で反射させれば消光比0となる。しかし、実際にはSi単結晶内で複数の格子面で $\theta_B \neq 45^\circ$ の反射を繰り返して1回反射と同じ方向に出てくるものが存在するので消光比が悪化する。**Multiple beam reflection**を減らすことが設計の鍵となる

1回反射

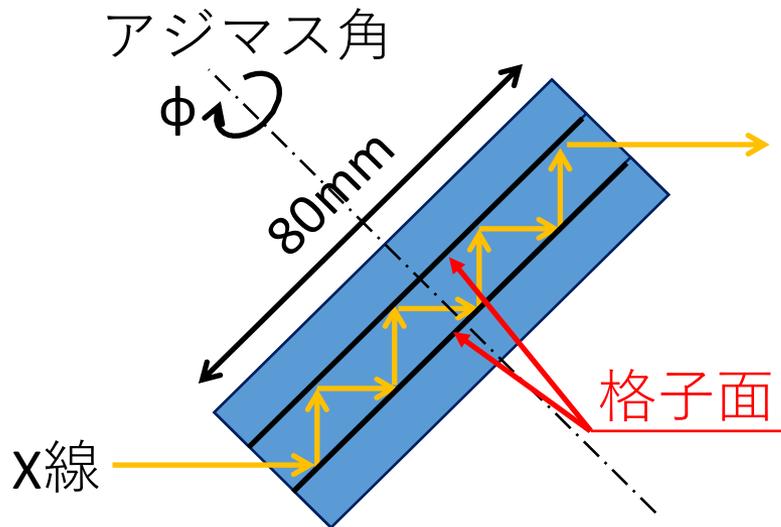


Multiple Beam Reflection

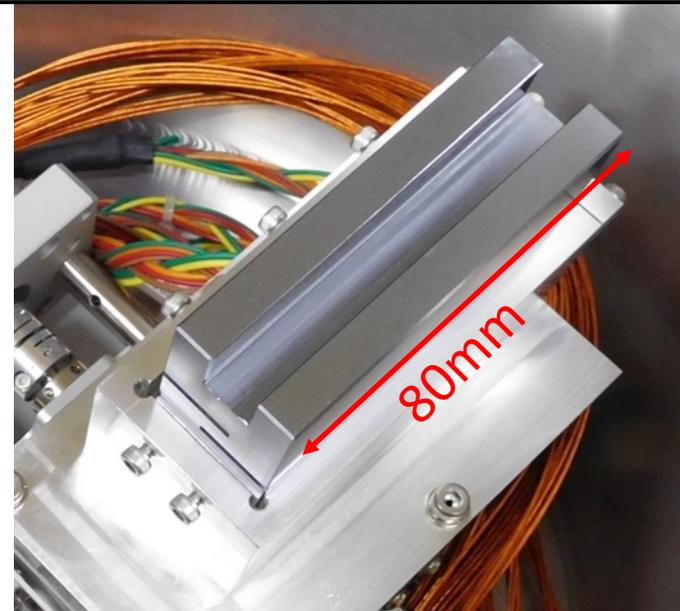


われわれのX線偏光子

- 我々の実験に適した光子エネルギー（7.3~11.1keV）において最も multiple beam reflection が少なくなるのは、**8.3878keV**のX線を **Si(-511)**面に $\theta_B=45$ 度かつ格子面まわりの回転角（アジマス角） $\phi=63.2$ 度（(255)の位置で $\phi=0$ ）で入射したとき。さらに**8回反射**させることで multiple beam reflection を抑制する偏光子（polarizer と analyzer の2個）を製作した



Si単結晶から削りだして製作



偏光子の性能テスト @SPring-8

- 2016年7月にSPring-8 BL19LXUビームラインで偏光子の性能評価（特に消光比の測定）を行った
- SPring-8 BL19LXU
 - 27mの長尺アンジュレータを有する高輝度ビームライン
 - パルスあたりの光子数 $\sim 10^6$ photons/pulse
 - パルス幅40ps
 - 繰り返しレート42MHz
 - 時間あたりの光子数は $\sim 5 \times 10^{13}$ photons/sec と大きい



セットアップ

EH1

Polarizer
水平偏光に
揃える

イオンチェンバー

Analyzer
垂直偏光のみ
通る

スリット

PIN/APD

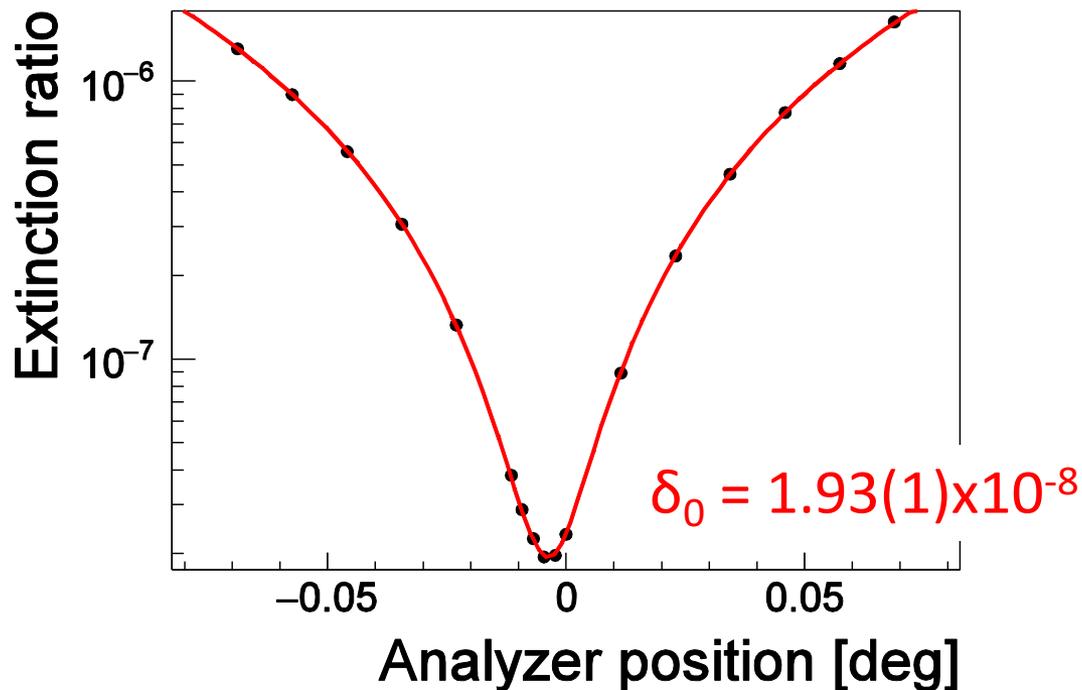
1870mm

蓋をあけると

PolarizerとAnalyzerは
90° ずらして配置
消光比 $\delta = T_{90^\circ} / T_{0^\circ}$
を測定する

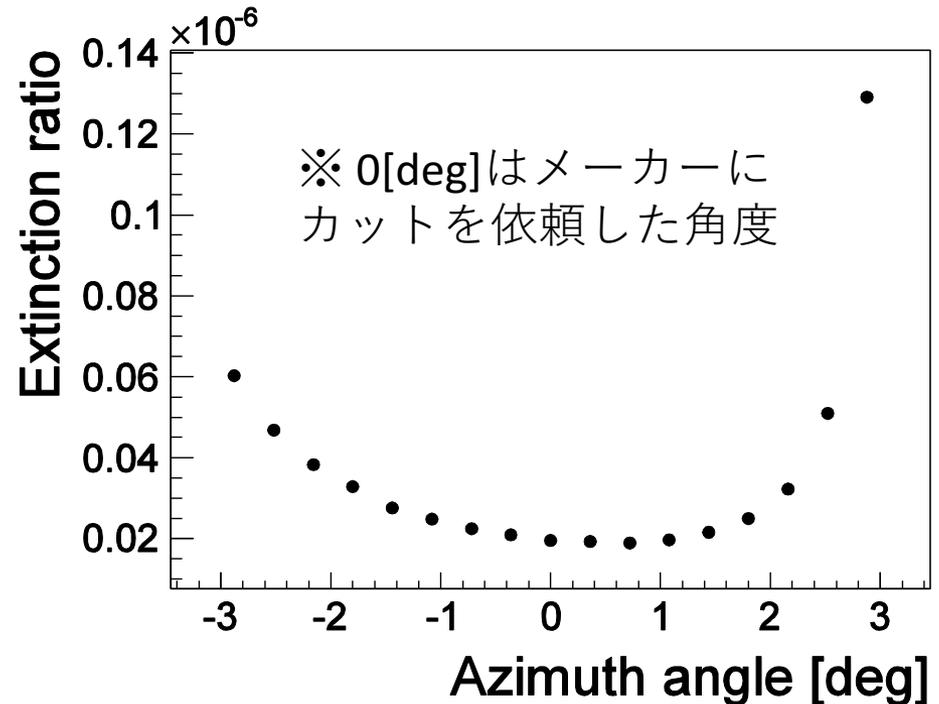
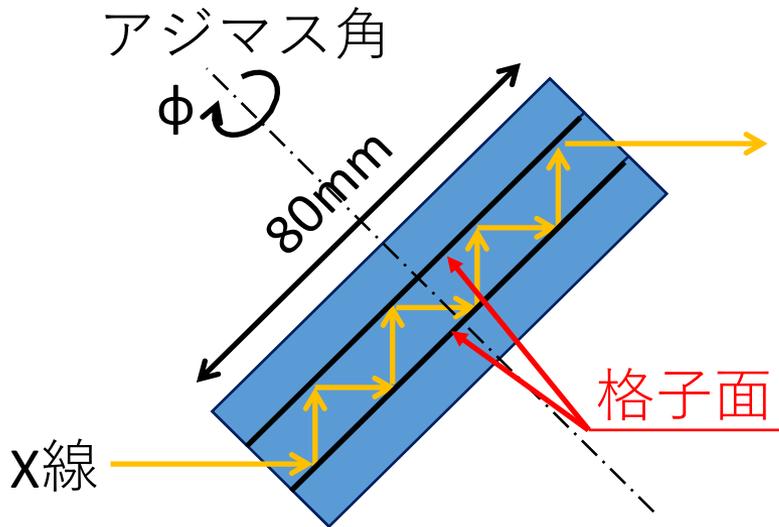
消光比測定結果 1/2

- Polarizer と analyzer を 90° ずらしたクロス配置のときに $\theta=0$ とすると、消光比は $\delta = (1-\delta_0)\sin^2\theta + \delta_0$ の角度依存性を持つ
- Analyzerの載ったスイベルステージで θ を変えながらPIN/APDに入射する光子数を測定する。得られた曲線から消光比 δ_0 が求まる



消光比測定結果 2/2

- 消光比 δ_0 はmultiple beam reflectionの量で決まるため、結晶のアジマス角に依存する。アジマス角を変えて前ページの測定を繰り返し、得られた δ_0 をプロットしたのが右下図。ベストのアジマス角および、悪くなる角度どうしのインターバルは予想どおりだったが、最もよい点でも $\delta_0 = 1.93(1) \times 10^{-8}$ で世界記録に2桁及んでいない



改善案と今後の予定

- Multiple beam reflectionではなく、polarizerで散乱したバックグラウンドが入ってきている可能性がある。Polarizerでブラッグ反射したビームの角度発散はFWHMで $100\mu\text{rad}$ なので、今年度中に2つの実験ハッチを使い距離を $\sim 10\text{m} = \sim 100\mu\text{rad}$ に伸ばした消光比測定を行う
- SACLAでX線とレーザーを衝突させて真空複屈折実験を行うための光学系の開発については、真空複屈折とほぼ同じ実験セットアップを用いる真空回折実験（次の2つの講演：稲田 22pSF10・清野 22pSF11）において研究を進めている
- 2017年度にまずはSACLAの2.5TWレーザーを用いてプロトタイプ実験を行う

まとめ

- SACLAに同期した500TW x2の強力な800nmレーザーを1 μ mレベルまで集光した $I=10^{22}$ [W/cm²]の高強度場によって $\Delta n=10^{-11}$ の真空複屈折を引き起こし、SACLAの高輝度X線と高性能偏光子を用いてプローブする新たな手法で真空複屈折を探索する
- SPring-8 BL19LXUビームラインで、新たに製作したX線偏光子の性能評価を行い、消光比 $\delta_0 = 1.93(1) \times 10^{-8}$ を得た。さらなる性能向上を目指し、今年度中にpolarizerで散乱したバックグラウンドを抑えた測定を行う
- X線と800nmレーザーの衝突手法については同時に真空回折実験（次の2つの講演：稲田 22pSF10・清野 22pSF11）として研究を進めており、2017年に真空複屈折のプロトタイプ実験（2.5TWレーザーを使用）を予定している