

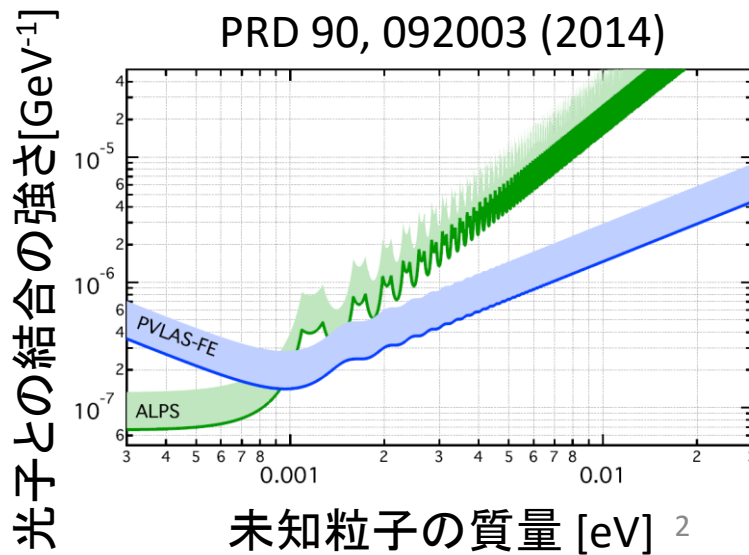
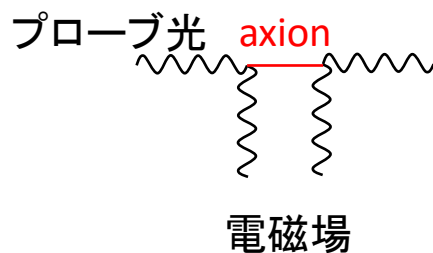
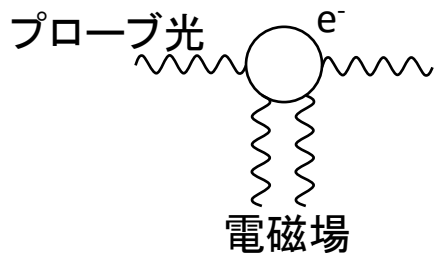
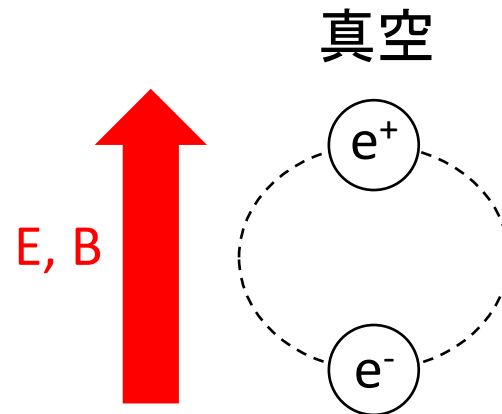
X線自由電子レーザー施設SACLA における真空複屈折の探索

山崎高幸, 難波俊雄, 浅井祥仁^A,
藪内俊毅^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

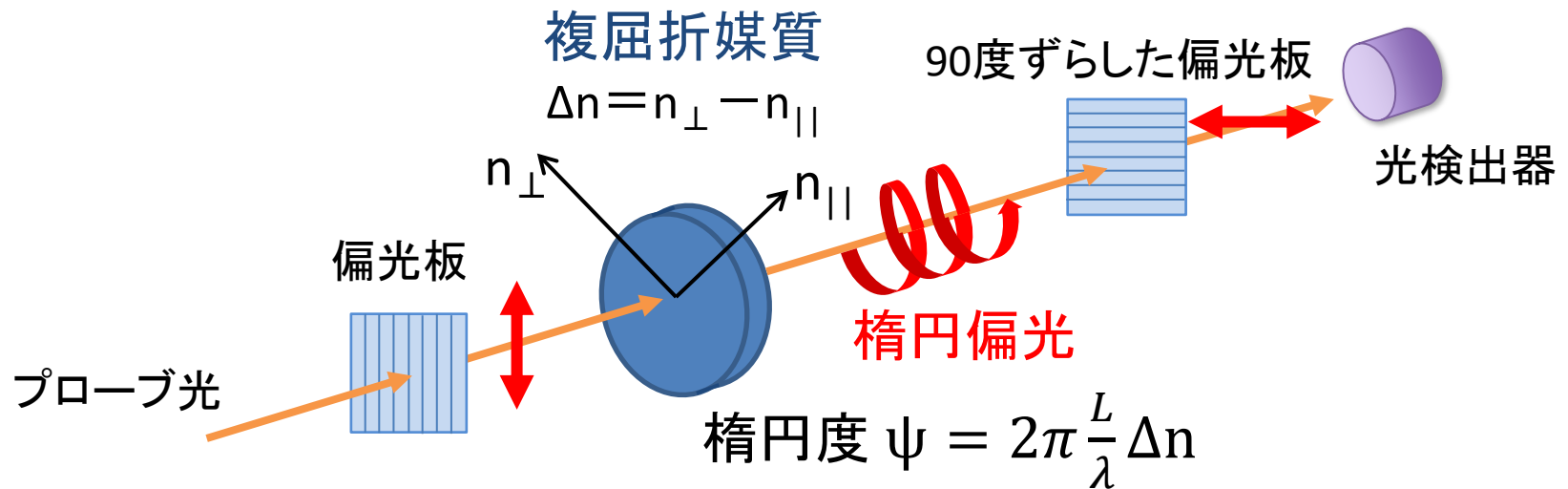
東大素セ, 東大理^A, 理研/SPring-8/SACLA^B, JASRI/XFEL^C

真空複屈折とは

- 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**
- 2000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50倍である $\Delta k_{CM} = 2 \times 10^{-22} [T^{-2}] (1\sigma)$ が最高感度
- 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 $\Delta n = k_{CM} B^2$ ($k_{CM} = 4 \times 10^{-24} [T^{-2}]$)なので、10Tの磁場でも $\Delta n = 4 \times 10^{-22}$ と極めて小さい

- 強力なレーザーを集光した高強度な電磁場を用いて $\Delta n = 10^{-11}$ の真空複屈折を引き起こし実験を行う(このトーク)
- 高フィネスのFabry-Pérot共振器を用いて複屈折媒質中を何度も通すことで得られる楕円偏光度を増やす(次のトーク)

SACLAの同期レーザーシステム

- 強力なレーザーが鍵となるが、実はSACLAにはポンププローブ実験に利用するためにX線ビームに同期した光学レーザーが存在する
- すでに2.5TWのレーザーが利用可能で、新たに**500TW x2台**のレーザーをインストール中。回折限界である $1\mu\text{m}$ まで集光できれば **$I=3.2\times 10^{22}[\text{W}/\text{cm}^2]$** の高強度場が得られる。これは**磁場にして **$1.6\times 10^6\text{T}$**** に相当する

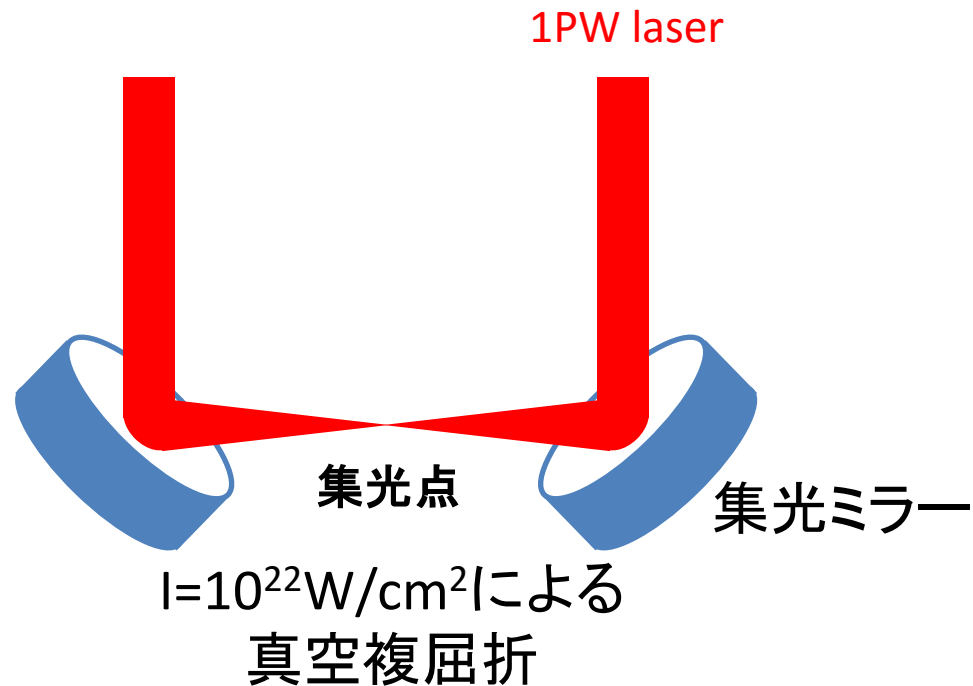
インストール中のPWレーザー



	現行 (Hydra-100, 2.5TW)	THALES 500TW x2
波長	800 nm	800 nm
パルスエネルギー	100 mJ	12.5 J x2
パルス幅	40 fs	25 fs
繰り返しレート	10 Hz	0.1 Hz

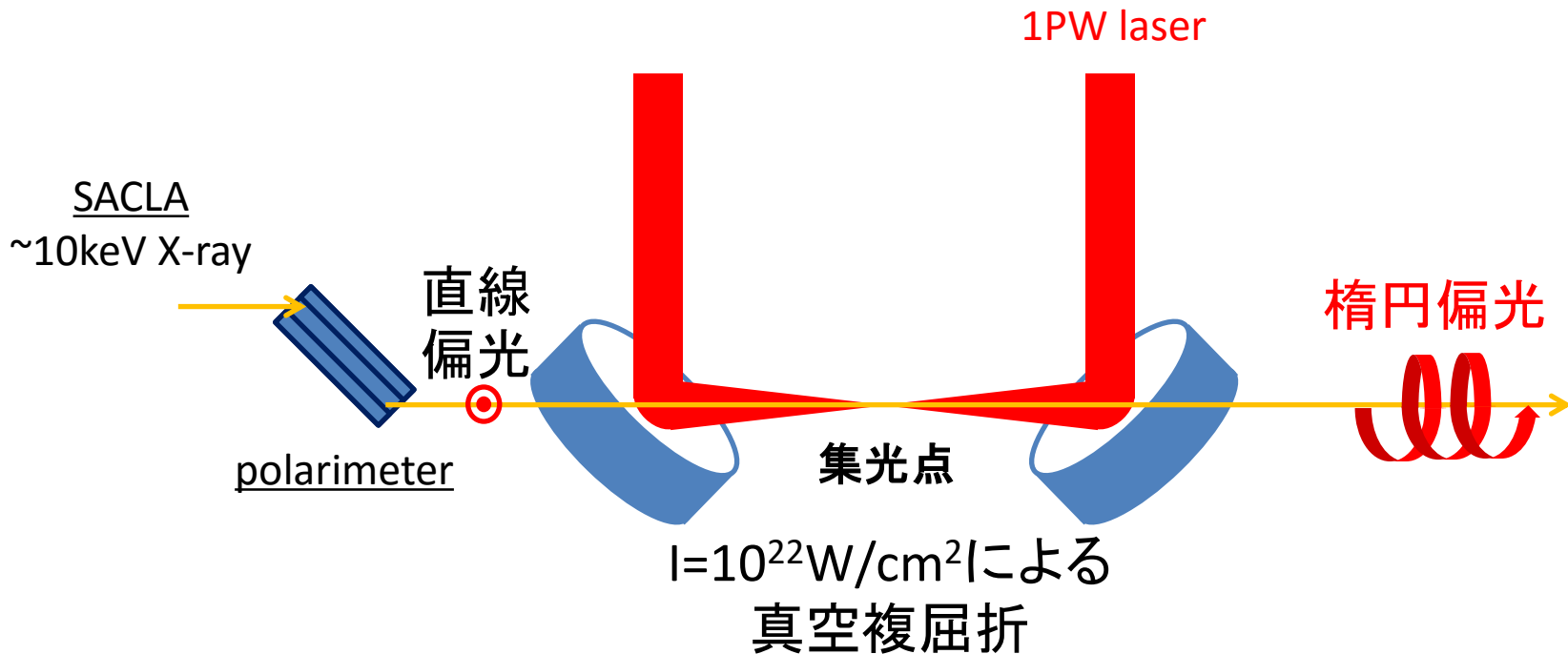
実験セットアップ

- まずはSACLAに同期する1PWの光学レーザーを回折限界の1 μm 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



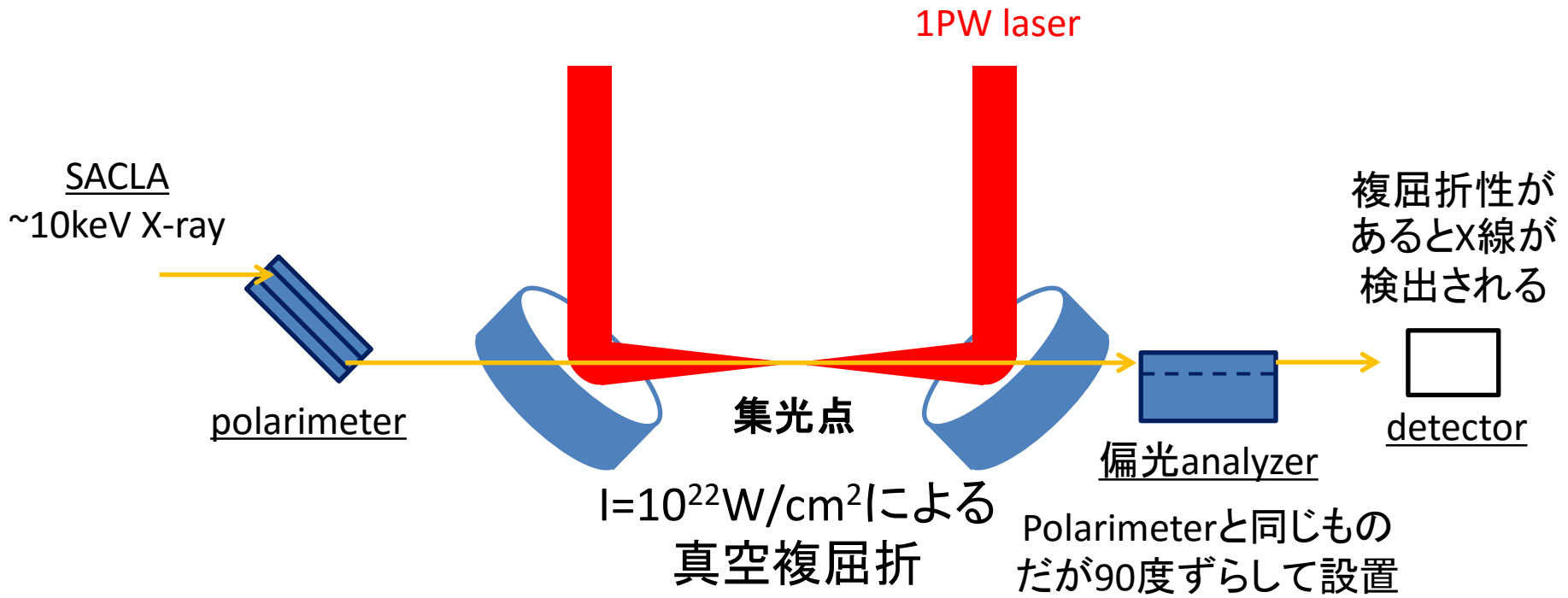
実験セットアップ

- 複屈折性を持つ真空にSACLAのX線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

- あとは楕円偏光度をX線偏光素子を用いて測定すればよい



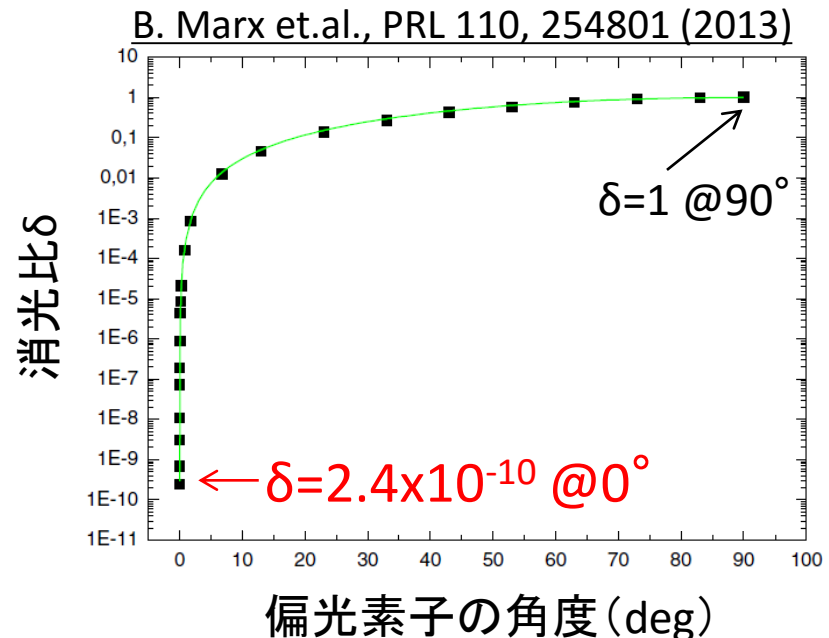
プローブとしてX線を用いる利点

1. 複屈折 Δn で長さ L の媒質中を通り抜けたときに、直線偏光が楕円偏光に変わるが、このときの楕円度 ψ はプローブ光の波長 λ として

$$\psi = 2\pi \frac{L}{\lambda} \Delta n$$

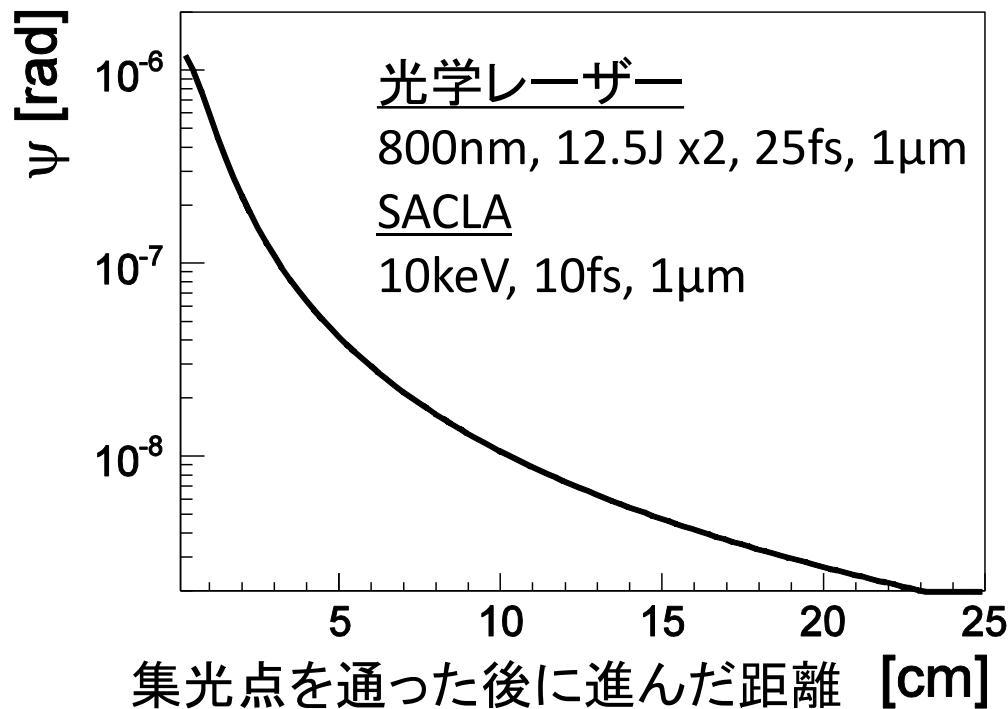
である。X線の波長は 1\AA と短いため、可視光に比べ4桁のゲインがある。また、ナীবに媒質の長さ L として光学レーザーのパルス長 $25\text{fs}=7.5\mu\text{m}$ を代入すると $\psi=3\times 10^{-6}[\text{rad}]$ に達する。

2. また、X線領域の偏光素子は消光比 $\delta = T_{\pi}/T_{\sigma}$ で $\delta=0(10^{-10})$ のものが存在し、これも可視光での $\delta=0(10^{-6})$ に比べると4桁性能が良いため、 $S/N=\psi^2/\delta\sim 1\%$ での測定が可能となる



ビーム形状の効果を取り入れた計算

- ナイーブな計算では $\psi=2\pi(L/\lambda)\Delta n=3\times 10^{-6}$ [rad]だが、実際に実験に用いるビームはSACLAのX線とPWの光学レーザーのいずれもガウスビーム形状をしたパルスレーザーであり、正しくはこれらの有限サイズ効果を取り入れて楕円度 ψ を計算する必要がある

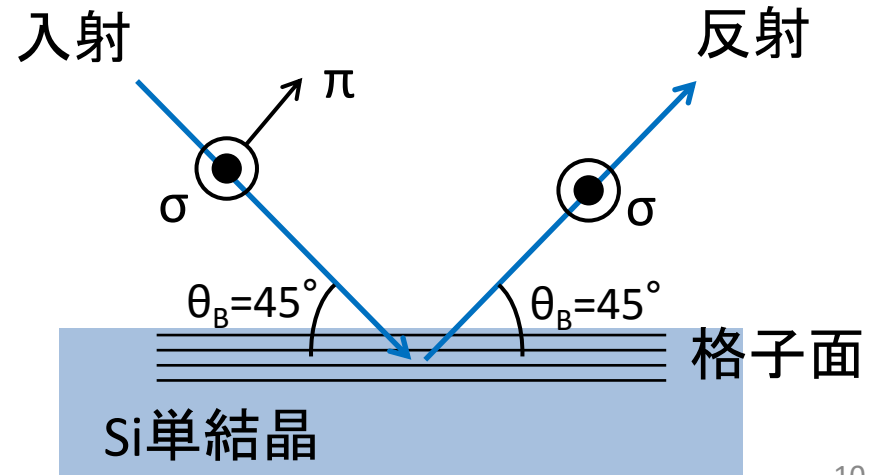
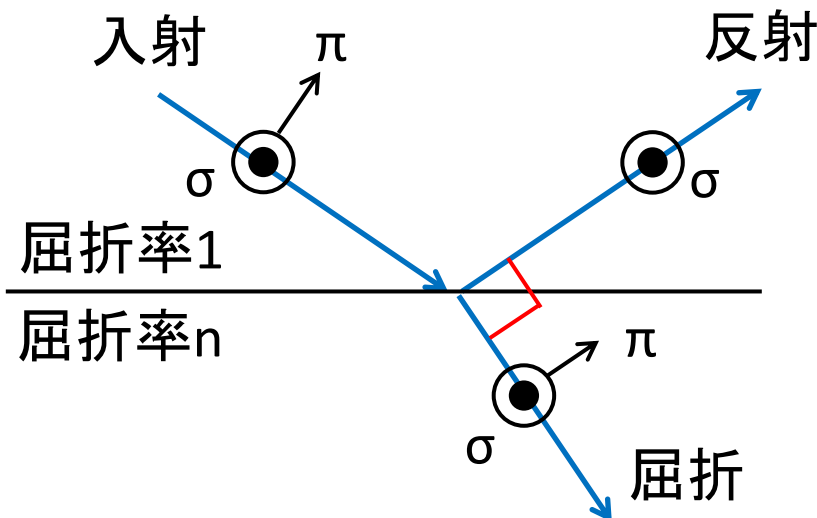


- 集光点直後の楕円度は $\psi=1\times 10^{-6}$ [rad]でナイーブな計算とほぼ同じだが、回折によりプローブ光が進むにつれて楕円度が低下する。偏光素子を集光点に近づけたセットアップが必要



X線偏光素子の設計

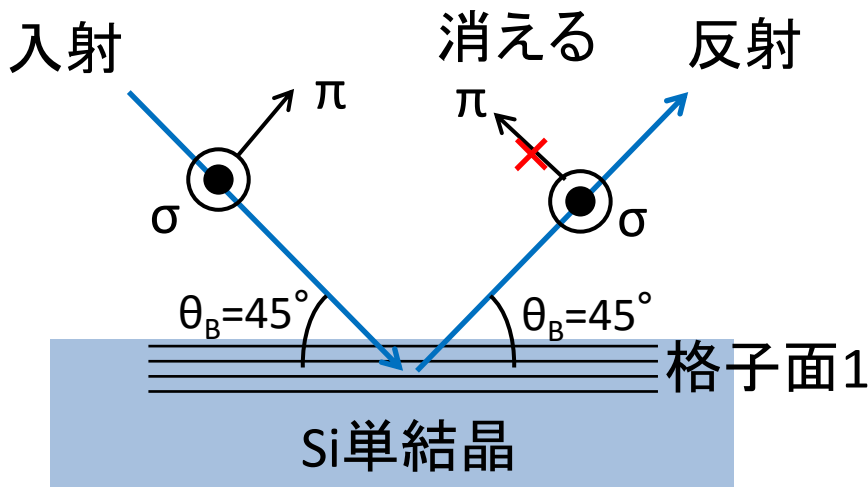
- 楕円度 $\psi=10^{-6}$ をS/N良く測定するため、我々の実験に適したエネルギーのX線に対してなるべく小さな消光比を持つX線偏光素子を新たに設計・製作する
- 基本原理は、ブリュースター角 ($\tan\theta=1/n$, n は屈折率。このとき屈折波の π 偏光成分による電子振動方向と反射波の方向が一致)で反射させて π 偏光を殺すというもの。X線に対する屈折率はほぼ1なのでブリュースター角は45度になる。大角度反射なので全反射ではなく、Si単結晶で $\theta_B=45$ 度のBragg回折をさせる



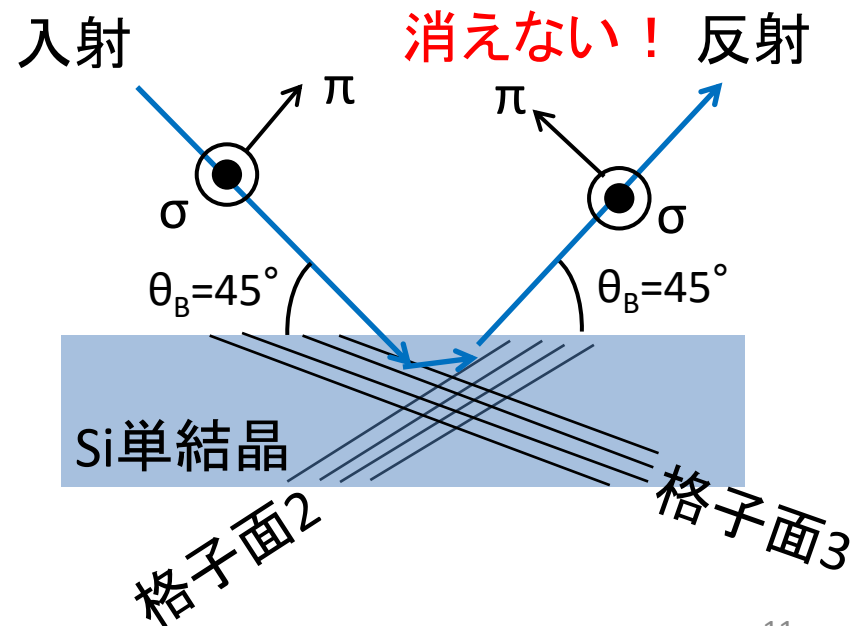
Multiple Beam Reflection

- 1回反射だけを考えてした場合、 $\theta_B=45^\circ$ 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し、これにより消光比が悪化する。**Multiple beam reflectionを減らすことが設計の鍵**となる

1回反射

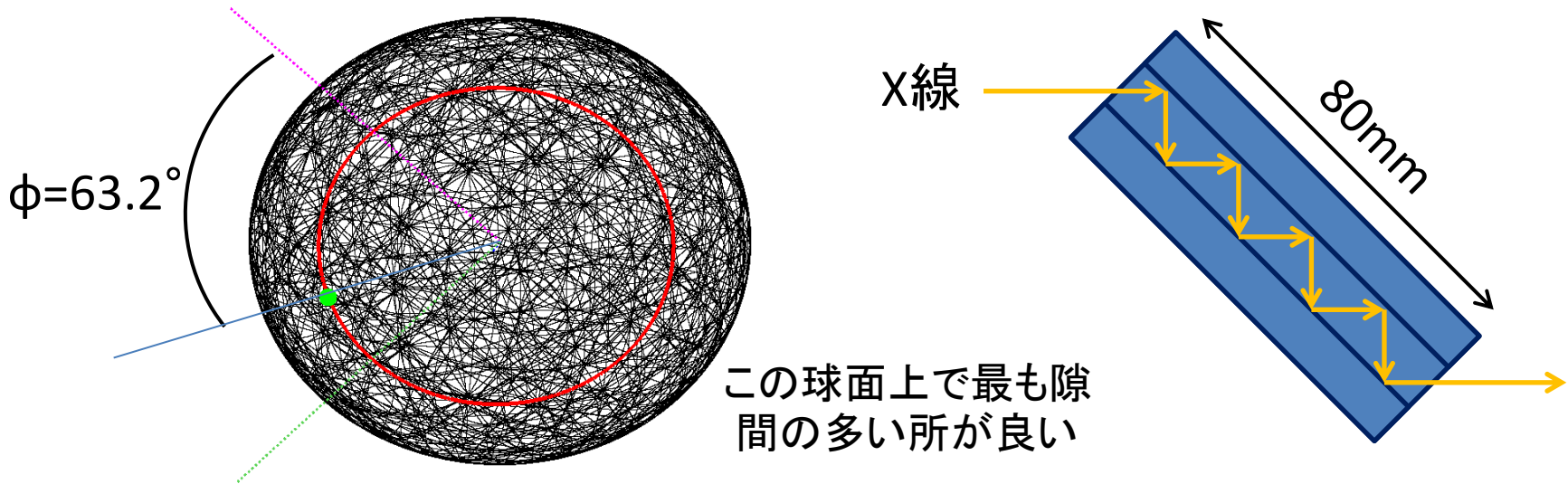


Multiple Beam Reflection



われわれのX線偏光素子のデザイン

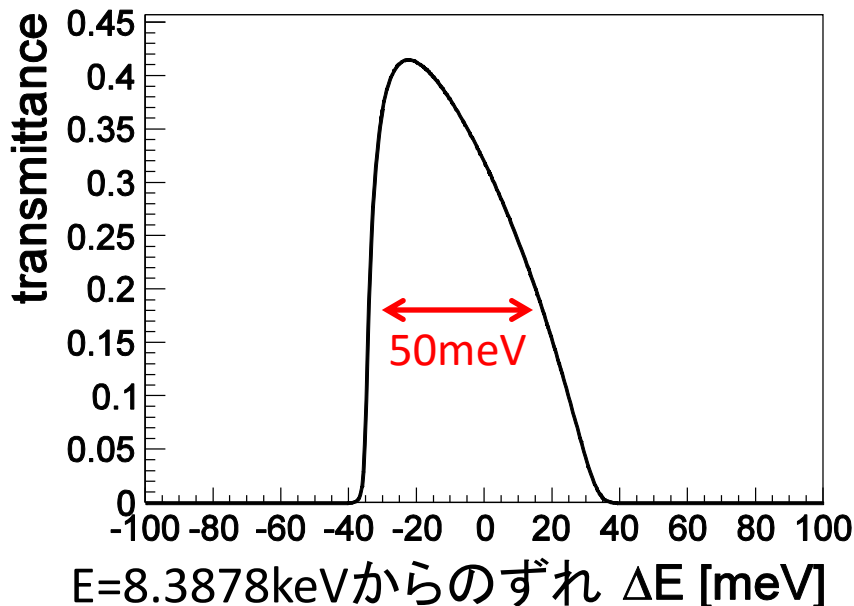
- 詳細は省くが、逆格子空間におけるEwald球を用いて計算したところ、我々の実験に適した光子エネルギー(7.3~11.1keV)において最も multiple beam reflectionが少なくなるのは、8.3878keVのX線をSi(-511)面に $\theta_B=45$ 度かつ格子面まわりの回転角 $\phi=63.2$ 度((255)の位置で $\phi=0$)で入射したときだとわかった
- これを採用し、さらにチャンネルカット形状(下図)にして8回反射させることでmultiple beam reflectionを抑制し消光比を改善させる



- 設計は完了。今年度中に製作して性能評価を行う予定

X線偏光素子の透過率

- X線ビームはエネルギーと角度に広がりを持つ(SACLAでは30eV, 1 μ m集光で100 μ rad)が、偏光素子はBragg反射を利用するため、使えるエネルギー幅や角度幅が制限され、実験に使える光子数は一部のみ
- 下図は今回設計した偏光素子における σ 偏光の透過率 T_{σ} を表すが、 $\Delta E=50\text{meV}$ (FWHM)程度しか受けられない(角度発散で言うと $\Delta E/E=\cot\theta\Delta\theta$ より $\Delta\theta=6\mu\text{rad}$ (FWHM))



- 実験の統計量を増やすためにはエネルギー幅と角度発散を抑える必要がある。以下のような対策を検討中
 - SACLAのシード化による単色性の向上(30eV \rightarrow 1eV)
 - 長距離で多段集光することで角度発散を抑制

予想感度と今後の予定

- 以下を仮定した場合、
 - SACLA : 4×10^{11} photons/pulse
 - 1PW(0.1Hz) $1 \mu\text{m}$ 集光で衝突直後の楕円度 $\psi \sim 10^{-6}$ [rad]
 - 偏光素子の消光比 $\delta = 10^{-10}$ 。また、SACLAがseed化により単色化し(1eV)、長距離での多段集光により角度発散を抑えて集光できるとする(このとき偏光素子の透過率 3.9×10^{-3})
 - Ge検出器の検出効率 = 85% @8.3878keV
- ビームタイム1回(2.5日)の測定で $\Delta k_{\text{CM}} = 3.8 \times 10^{-24}$ [T⁻²] (1 σ)となり、真空複屈折のQED理論値 $k_{\text{CM}} = 4.0 \times 10^{-24}$ [T⁻²] と等しい感度で探索可能
- PWレーザーの共同利用運転開始に向け、まずは今年度中にX線偏光素子の性能評価を行い、来年度には現在利用できる2.5TWレーザーを用いてプロトタイプ実験を行う予定である

まとめ

- SACLAに同期した1PWの強力な光学レーザーを用いて真空の複屈折を探索する
- SACLAおよび同期レーザーのビーム形状を考慮して計算した結果、1PWのレーザーを回折限界の μm レベルまで集光できれば ($I=10^{22}[\text{W}/\text{cm}^2]$)、真空複屈折による楕円度は $\psi=1\times 10^{-6}[\text{rad}]$ に達するとわかった
- 楕円偏光を測定するために必要となるX線偏光素子の設計を行った。現在世界最高性能のX線偏光素子 ($\delta=2.4\times 10^{-10}$ @6.457keV)と同レベルの消光比が得られれば、2.5日間の測定で真空複屈折のQED理論値と等しい感度で探索可能
- PWレーザーの共同利用運転開始に向け、まずは今年度中にX線偏光素子の性能評価を行い、来年度には現在利用できる2.5TWレーザーを用いてプロトタイプ実験を行う予定である