

X線自由電子レーザー施設SACLA における高強度レーザーを用いた 真空回折の探索 I

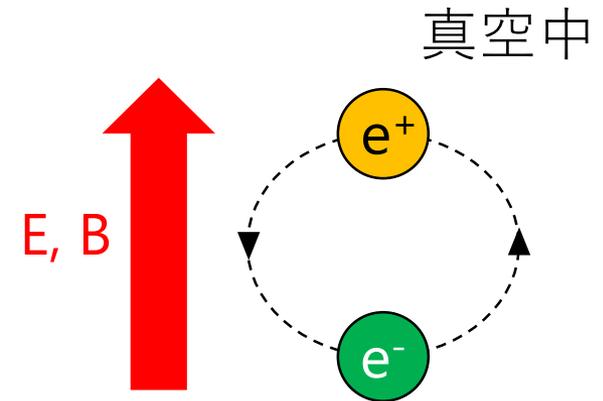
山崎高幸, 清野結大^A, 稲田聡明, 難波俊雄, 浅井祥仁^A,
藪内俊毅^B, 富樫格^{B,C}, 犬伏雄一^{B,C}, 大和田成起^B,
玉作賢治^B, 矢橋牧名^{B,C}, 石川哲也^B

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



真空の非線形効果

- 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・磁化する（真空偏極）
- 真空偏極によって真空は非線形光学媒質として振る舞うようになり、probe光を通した際に様々な現象が预言されているが、いずれも未発見
 - ✓ 真空複屈折（偏光変化）
 - ✓ 真空回折（運動量変化）
 - ✓ HHG, photon splitting（周波数変化）



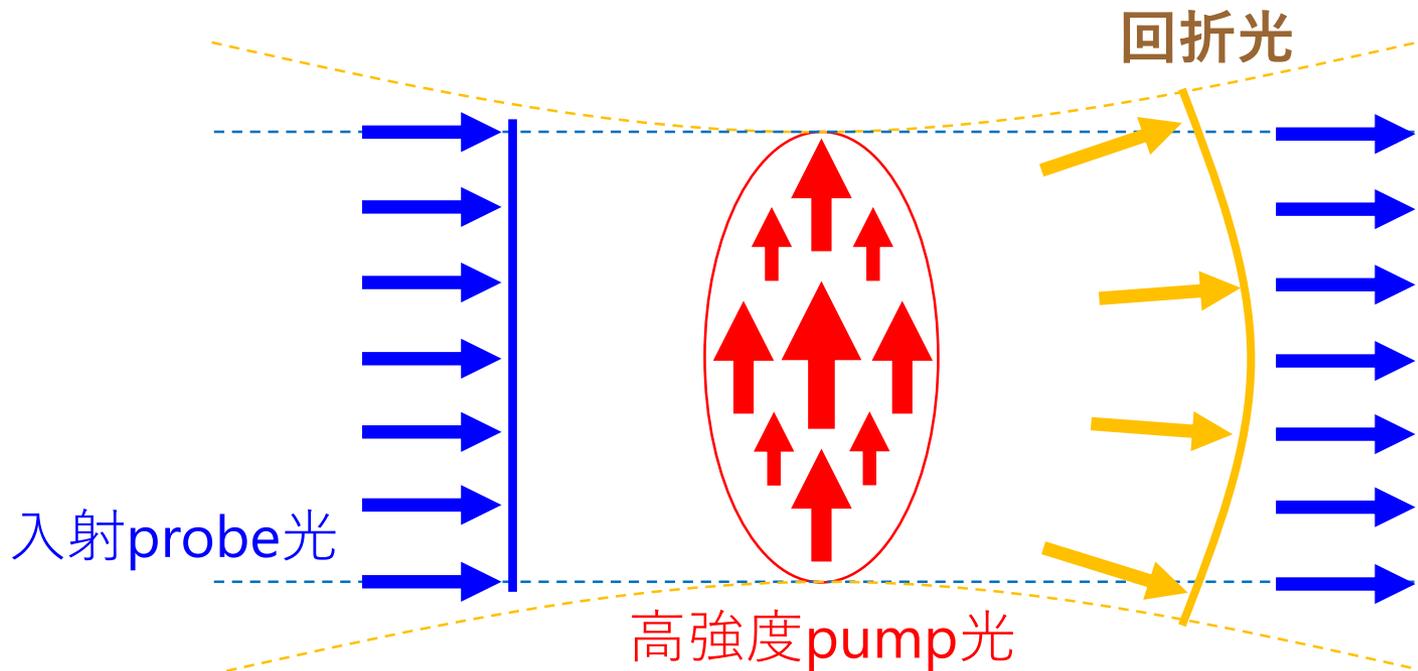
われわれは**PWクラスの高強度レーザー**をpump光に用いて真空を偏極させ、**XFEL**をprobeとして真空回折を探索する

真空回折

- 高強度場を印加すると、真空の屈折率は1からわずかにずれる

$$n = 1 + 9 \times 10^{-24} B[T]^2$$

- 非一様な高強度場（例えば集光した高強度レーザー）によって真空をpumpし、屈折率勾配を生じさせる
- ここにprobe光を通すと、一部が回折される

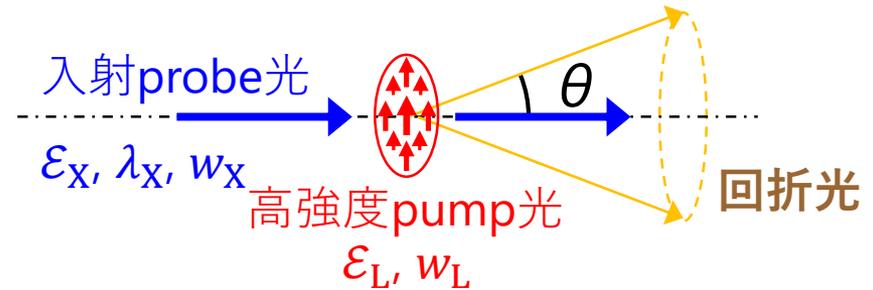


真空回折の確率

- Pump光を通過した際に回折した光の角度分布は以下の式

$$\frac{dN}{d \cos \theta} \propto \boxed{\varepsilon_L^2 \cdot \frac{\varepsilon_X}{\lambda_X^2} \cdot \frac{1}{w_L^2 (w_L^2 + 2w_X^2)}} \times \left(\frac{w}{\lambda_X} \right)^2 \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{w\theta}{\lambda_X} \right)^2 \right)$$

$$w^2 = \frac{w_L^2 w_X^2}{w_L^2 + 2w_X^2}$$



- ε_L : pump光のパルスエネルギー
- w_L : pump光のビームサイズ
- ε_X : probe光のパルスエネルギー
- λ_X : probe光の波長
- w_X : probe光のビームサイズ

Pump : パルスエネルギーが大きなビームを集光

→ PWクラスレーザーの μm 集光

Probe : 短波長でパルスエネルギーが大きい (ε/λ^2 が大きい) ビーム

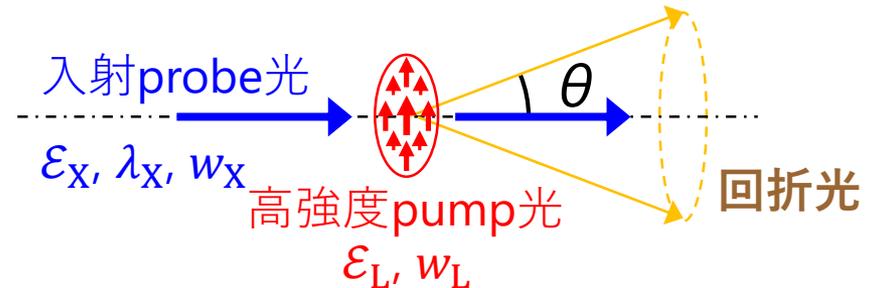
→ X線自由電子レーザー (XFEL)

真空回折による角度発散

- Pump光を通過した際に回折した光の角度分布は以下の式

$$\frac{dN}{d \cos \theta} \propto \epsilon_L^2 \cdot \frac{\epsilon_X}{\lambda_X^2} \cdot \frac{1}{w_L^2 (w_L^2 + 2w_X^2)} \times \left(\frac{w}{\lambda_X} \right)^2 \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{w\theta}{\lambda_X} \right)^2 \right)$$

$$w^2 = \frac{w_L^2 w_X^2}{w_L^2 + 2w_X^2}$$



- ϵ_L : pump光のパルスエネルギー
- w_L : pump光のビームサイズ
- ϵ_X : probe光のパルスエネルギー
- λ_X : probe光の波長
- w_X : probe光のビームサイズ

- Pumpもprobeも集光して相互作用領域を小さくする
- 角度発散 \propto probeの波長だが、一般にビームエミッタンス \propto 波長 (普通のレーザーで $1\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、XFELで $10^{-4}\text{mm} \cdot \text{mrad}$)

実験場所：SACLA (BL2 EH6)

- X線自由電子レーザーと高強度レーザーの両方が使える！

Probe : X線自由電子レーザー

- 4~29 keV ($\sim 1 \text{ \AA}$)
- $\sim 0.5 \text{ mJ/pulse}$
- 角度発散 0.8 \mu rad
- パルス幅 $< 10 \text{ fs}$
- 繰り返しレート 30 Hz

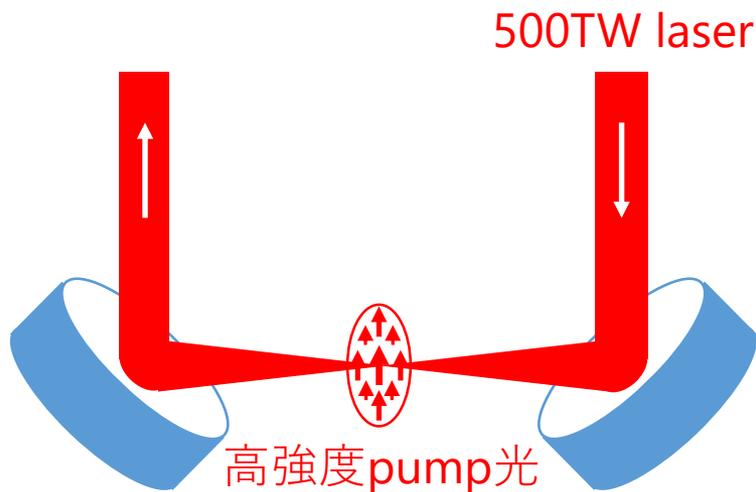
Pump : 500TWレーザー x2

- 800 nm
- 12.5 J/pulse x2 (ϵ/λ^2 ではXFELより3桁小さいことに注意)
- パルス幅 25 fs
- 繰り返しレート 1 Hz
- 2017年中にインストール完了予定



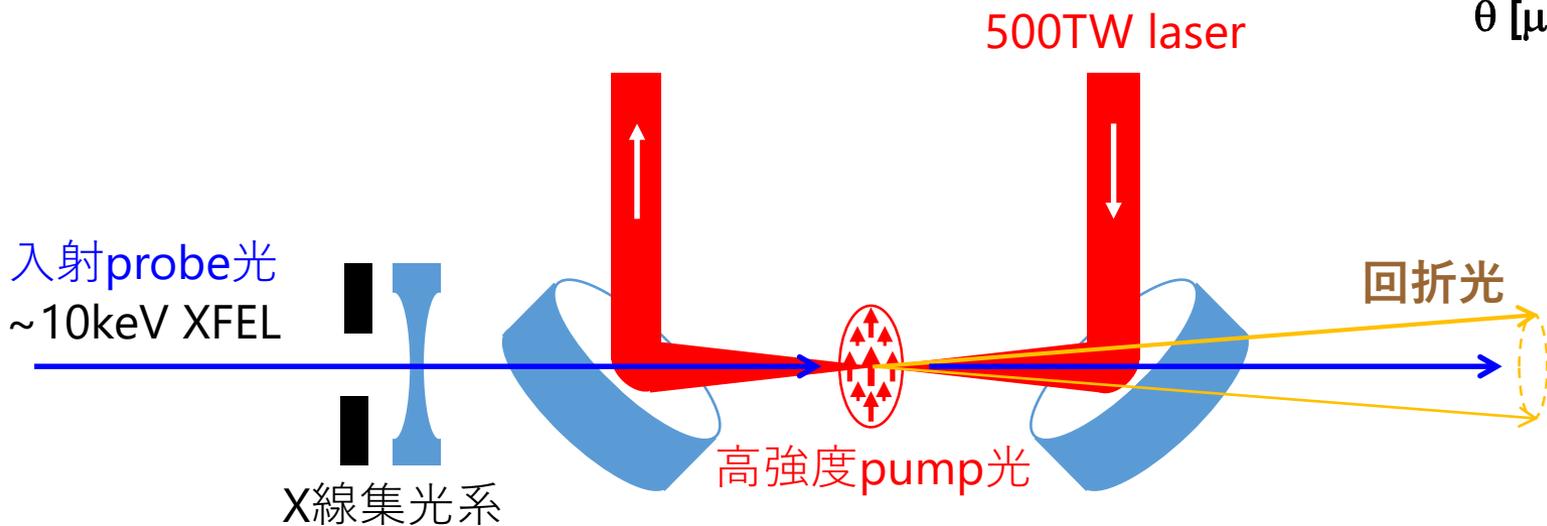
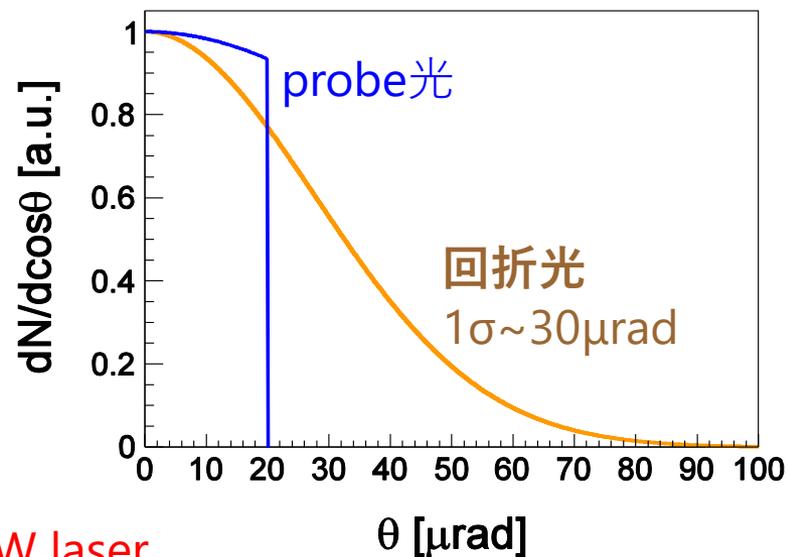
実験セットアップ

- 500TWのpumpレーザーを回折限界の $1\mu\text{m}$ まで集光することで得られた高強度場で真空を偏極させ、屈折率勾配を発生させる



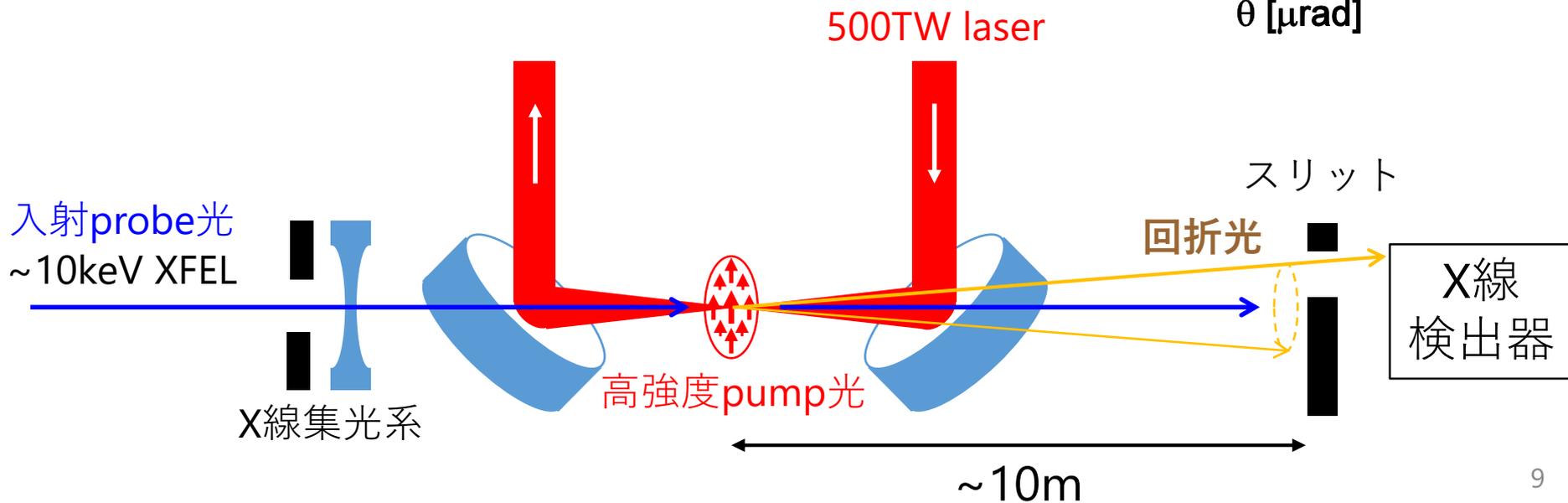
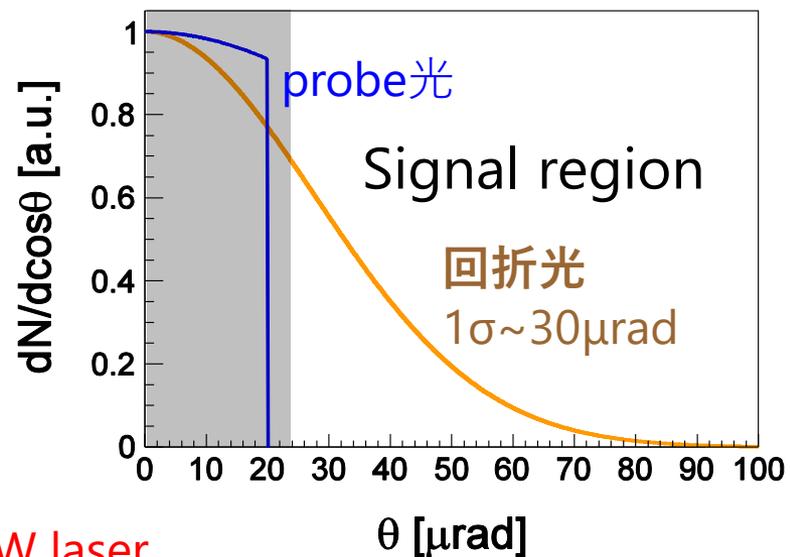
実験セットアップ

- Probe光をBeレンズとスリットを用いて角度発散の増加を抑えつつ1 μm に集光し、pumpレーザーの集光点で正面衝突させると、わずかな確率 ($P \sim 5 \times 10^{-14}$) で回折を起こす。回折によって獲得する角度発散は1 σ で30 μrad 程度



実験セットアップ

- スリットを用いて回折光だけを切り出す
- 500TWレーザーの繰り返しレート1Hzで全て完璧に衝突した場合、1.5日間DAQでシグナル数は約3000発に達する



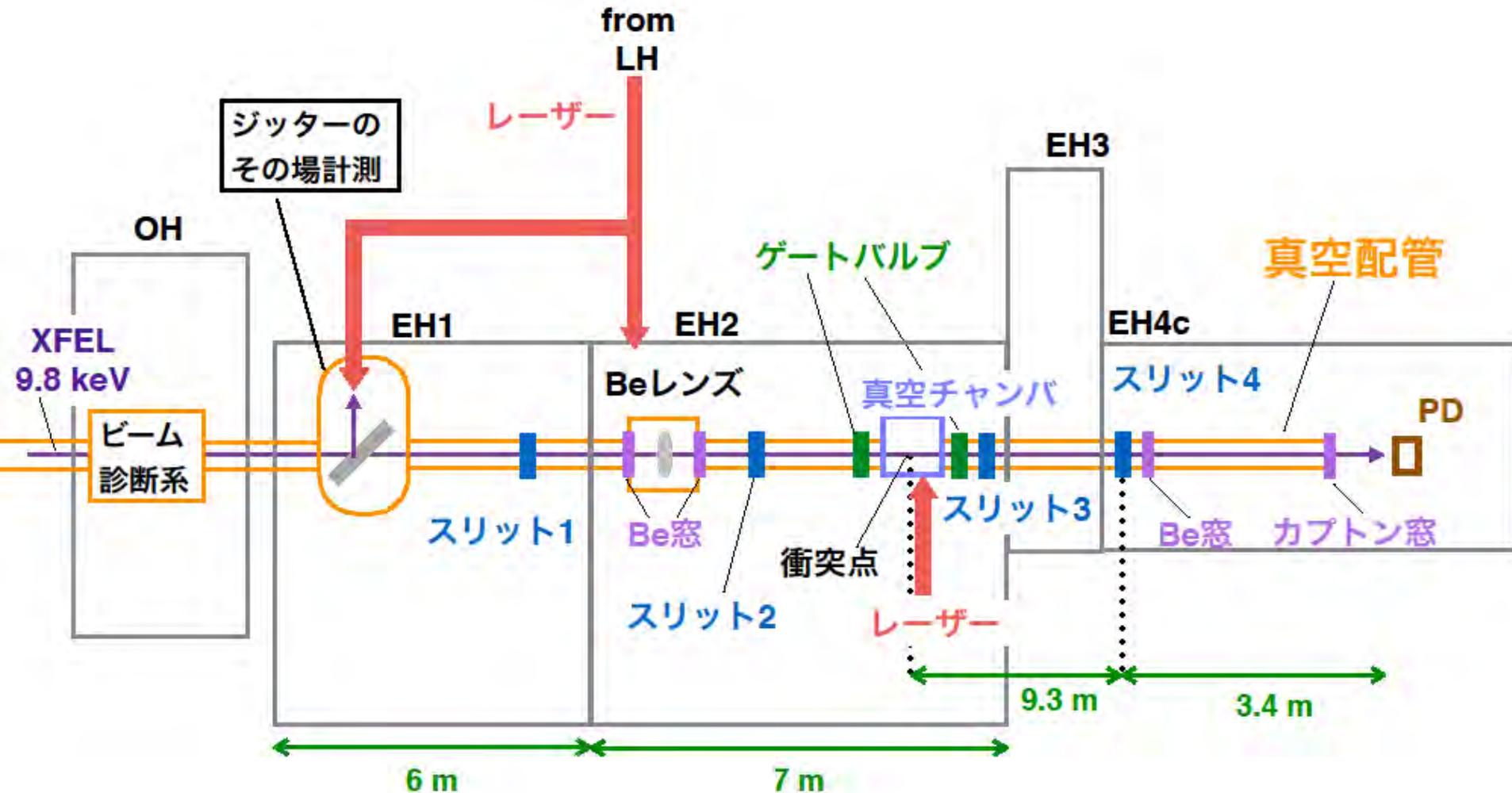
真空回折実験のポイント

- シグナルを十分に得るために必要な要素
 - 高強度レーザーの集光
 - 空間的な位置合わせ（ゼロ点、ふらつき）
 - 時間的な位置合わせ（ゼロ点、ふらつき）
- バックグラウンドは 5×10^{11} photons/pulseのprobe XFEL（1.5日DAQ、1Hzで 6×10^{16} photons）に由来。以下の手法でどれだけ抑制できるかが課題
 - X線を集光する際にスリットで角度発散の大きな成分をカット
 - 衝突点以降に設置した複数のスリットで回折した角度発散の大きな成分のみを切り出す

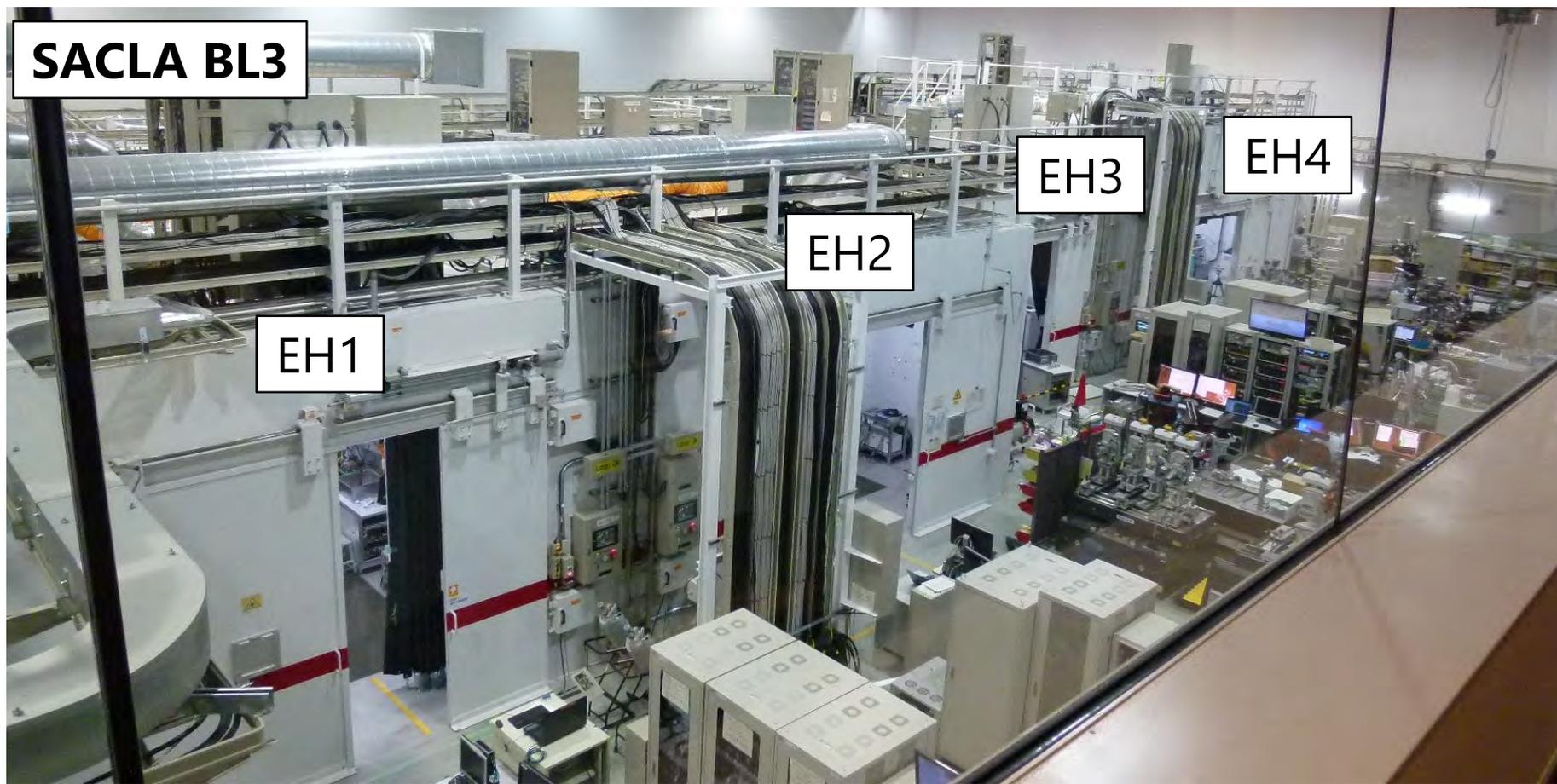
いきなり500TW 1 μ m集光は無茶。まずは**1st step**として、すでにSACLAで利用できる**2.5TW**レーザー（Hydra）を**10 μ m集光**し**初の真空回折探索**（理論値より20桁悪い感度）を目指す

2.5TWレーザーでの実験

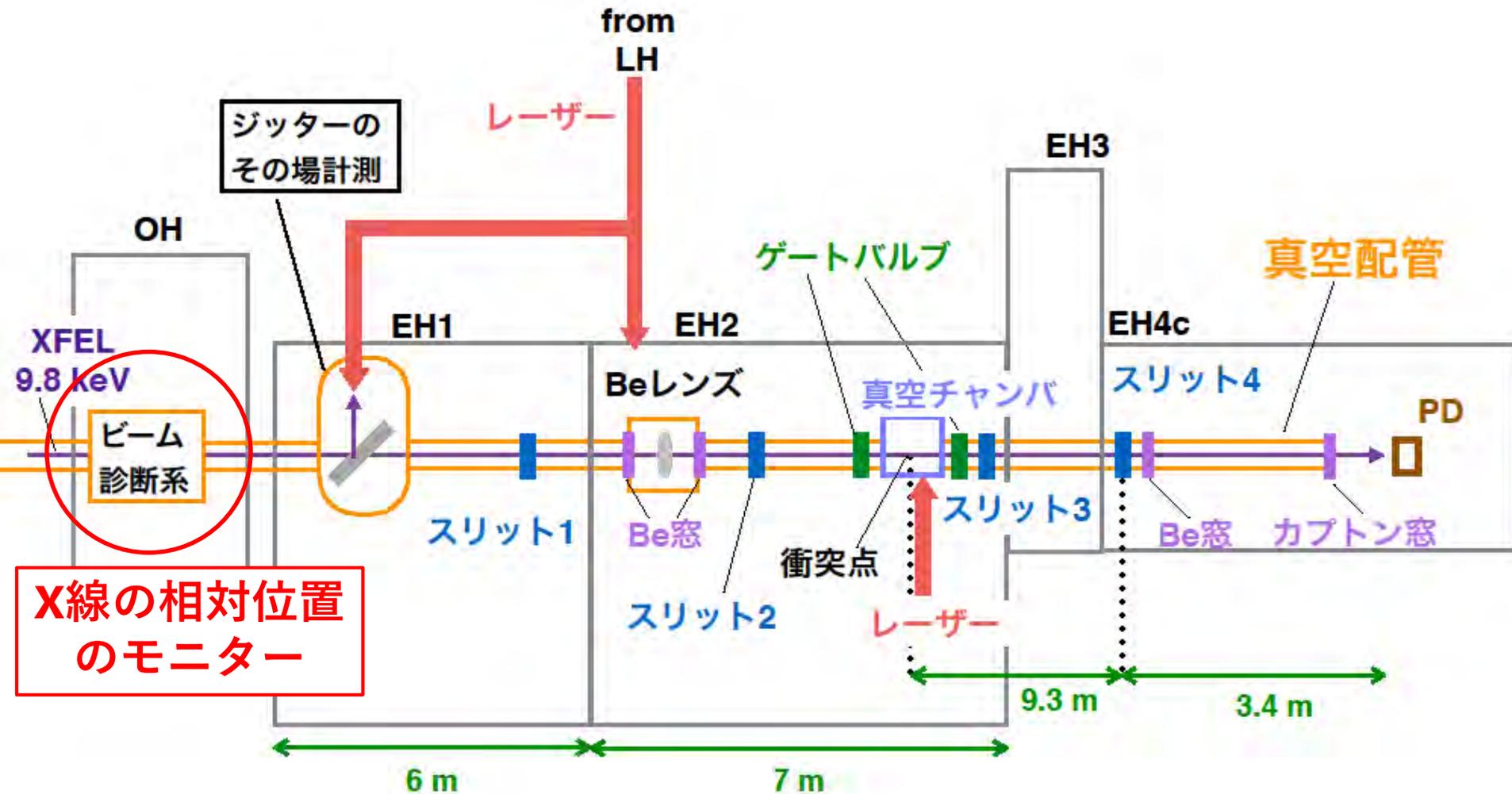
- 2016/11/6 – 2016/11/9の2.5日間のビームタイムで2.5TWレーザー（Hydra）を用いて実験を行った



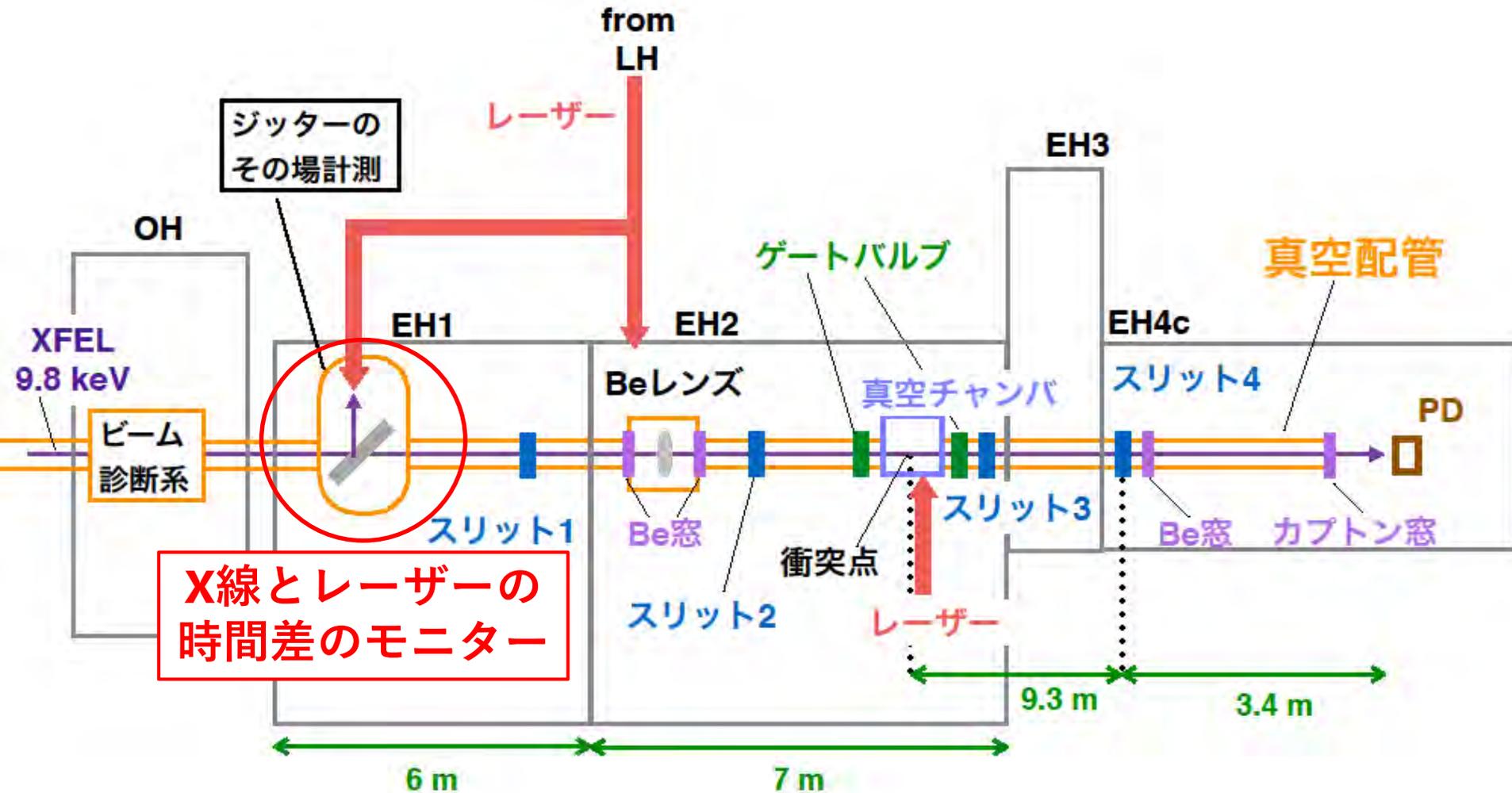
実験ホール写真



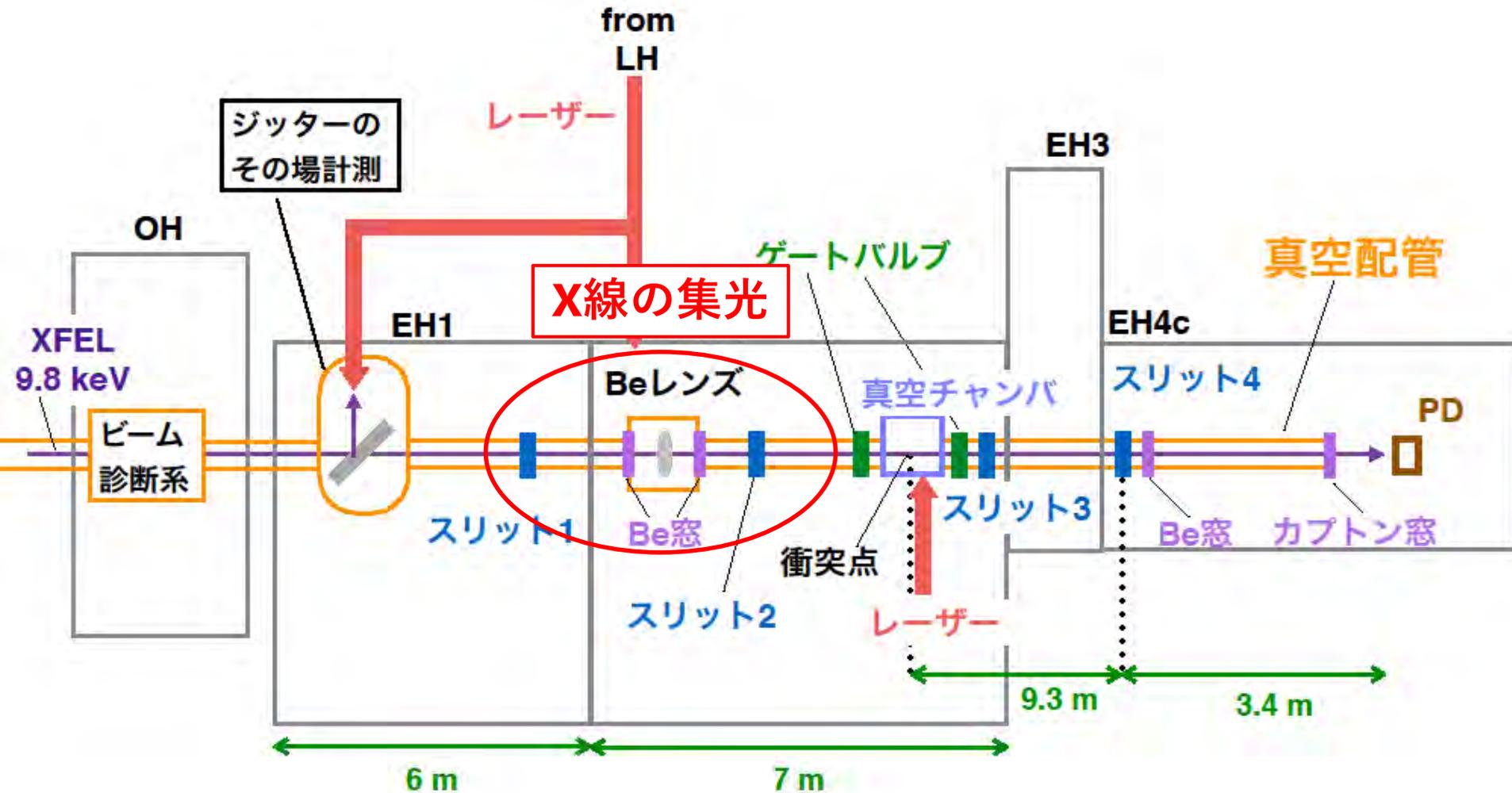
実験セットアップ (全体像)



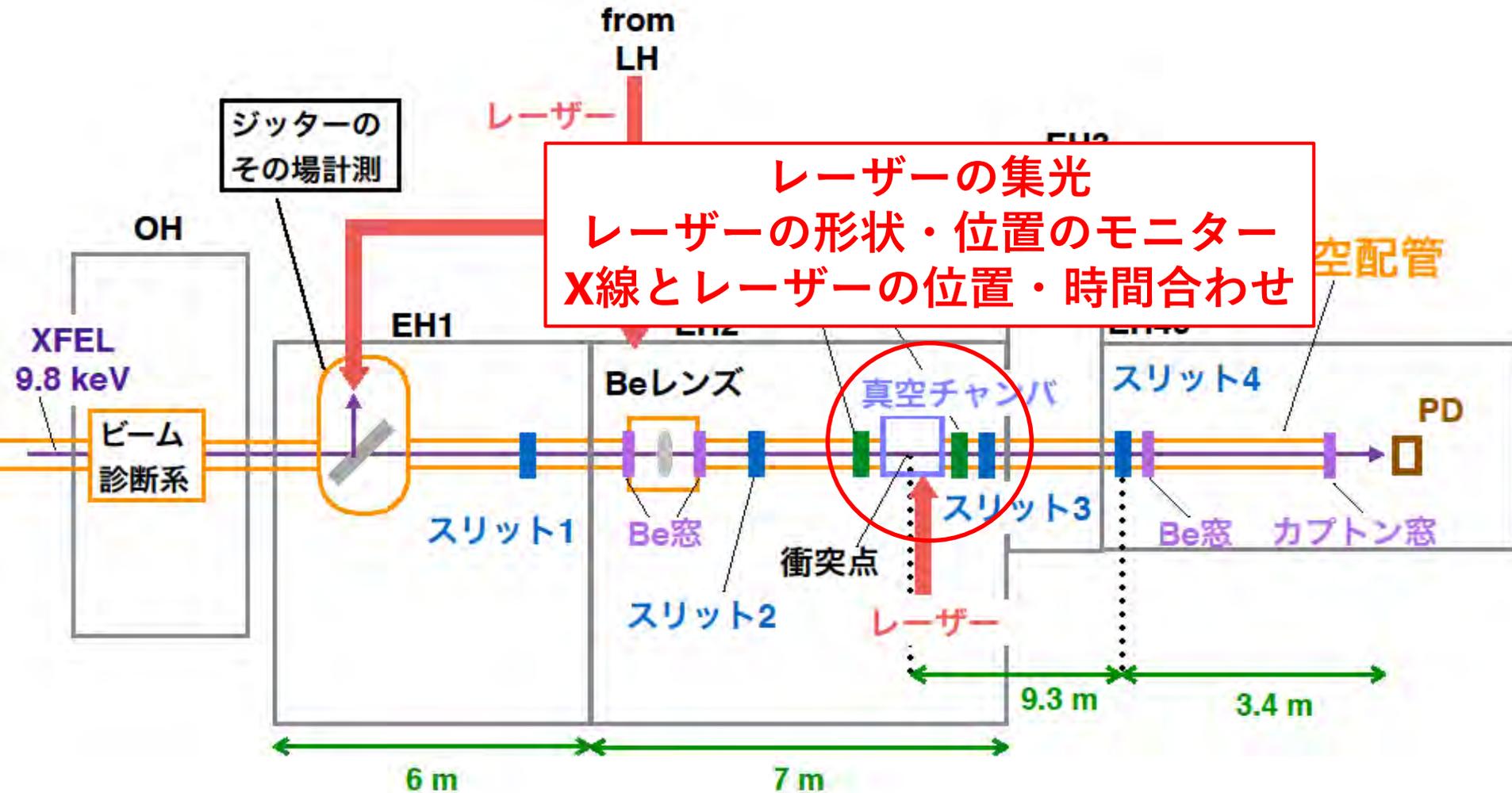
実験セットアップ (全体像)



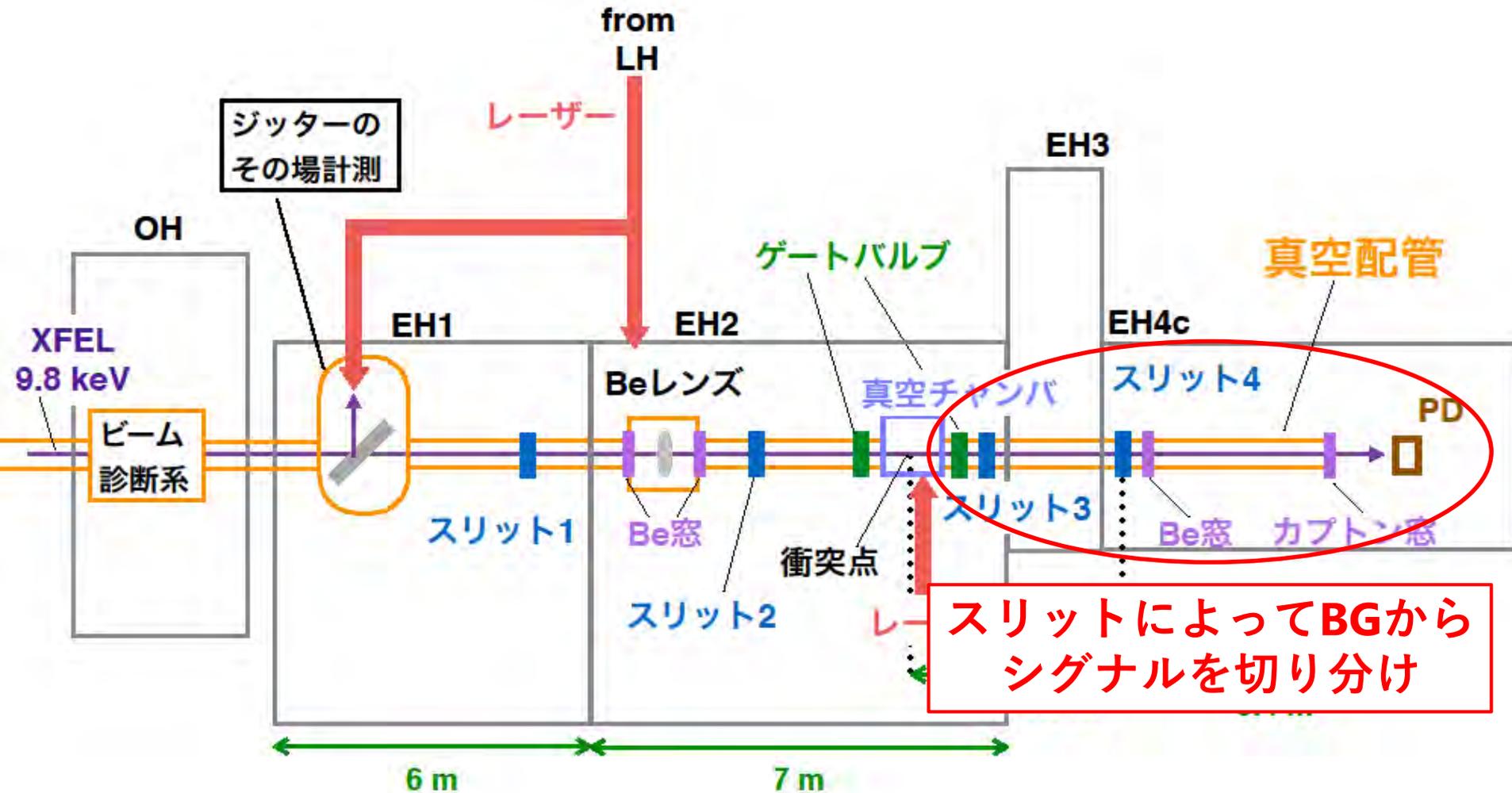
実験セットアップ (全体像)



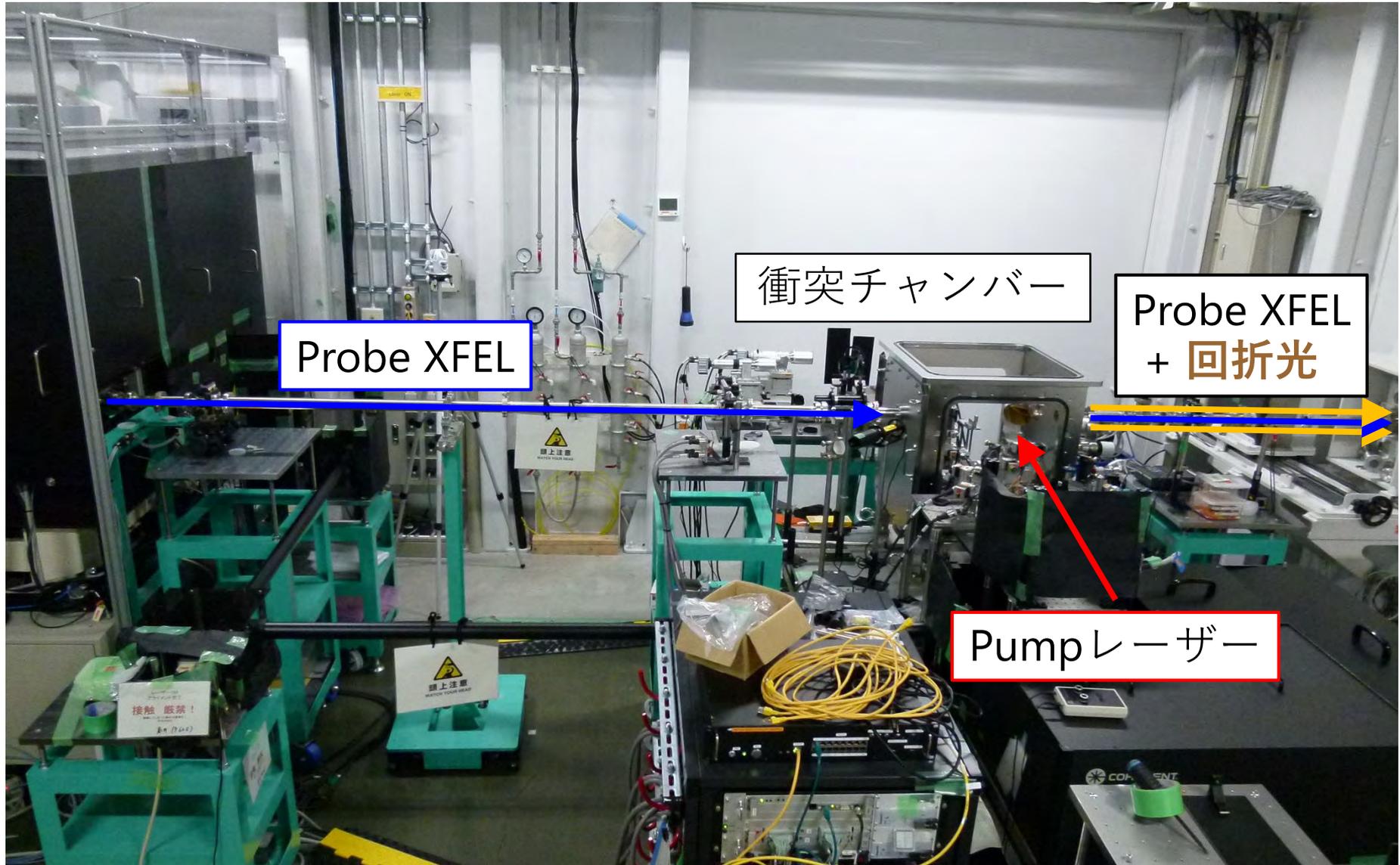
実験セットアップ (全体像)



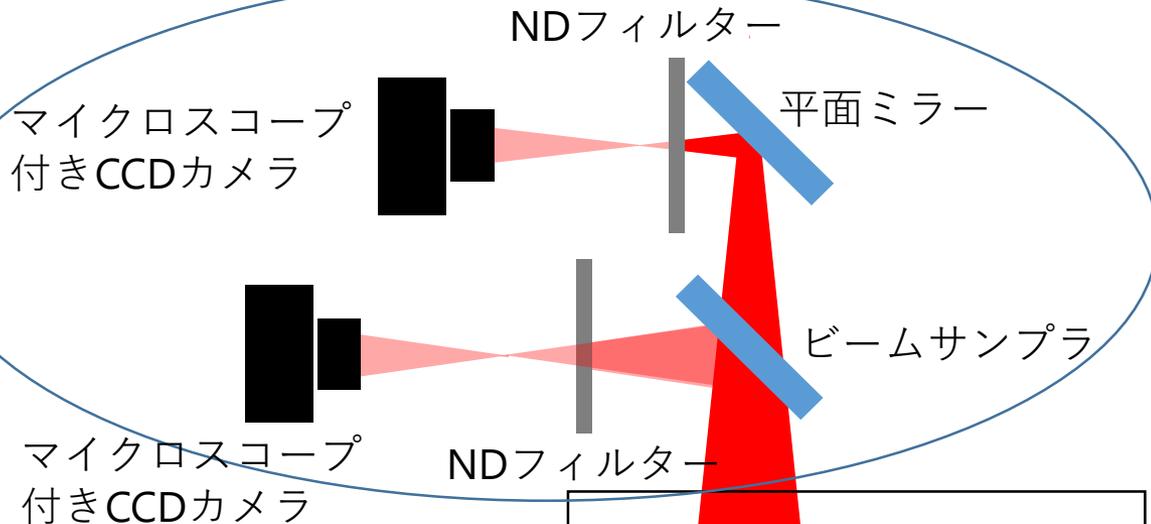
実験セットアップ (全体像)



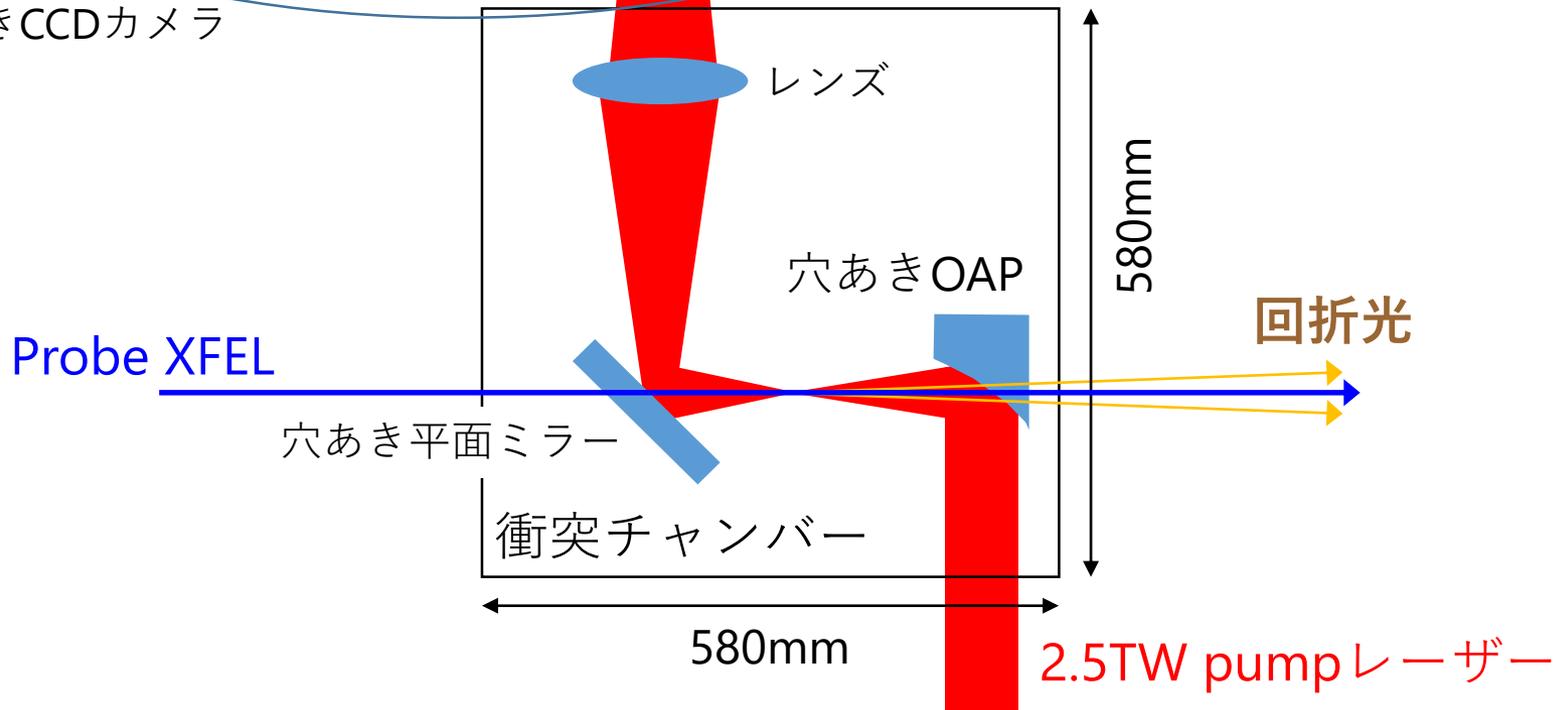
EH2の写真



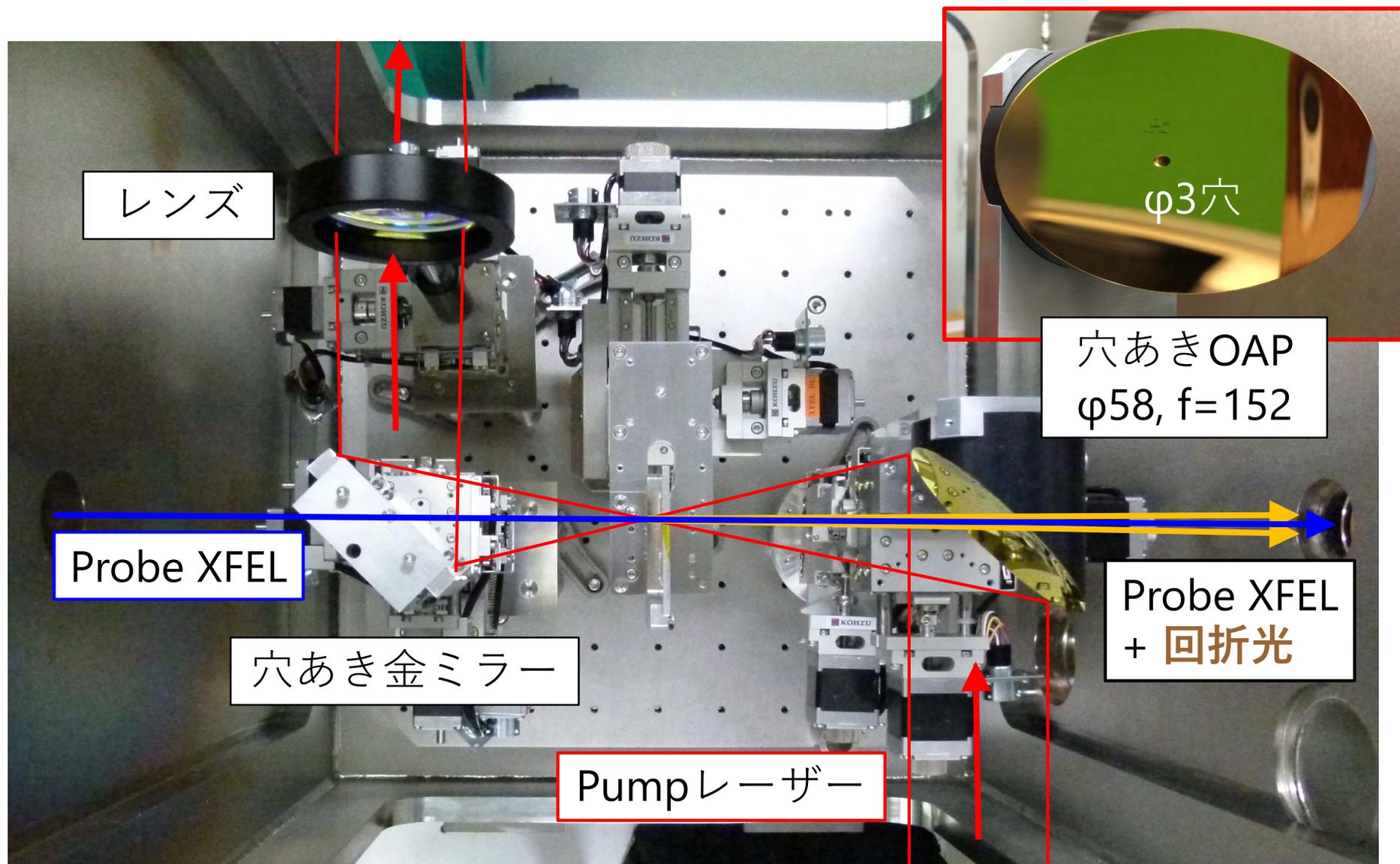
衝突点まわりの光学系



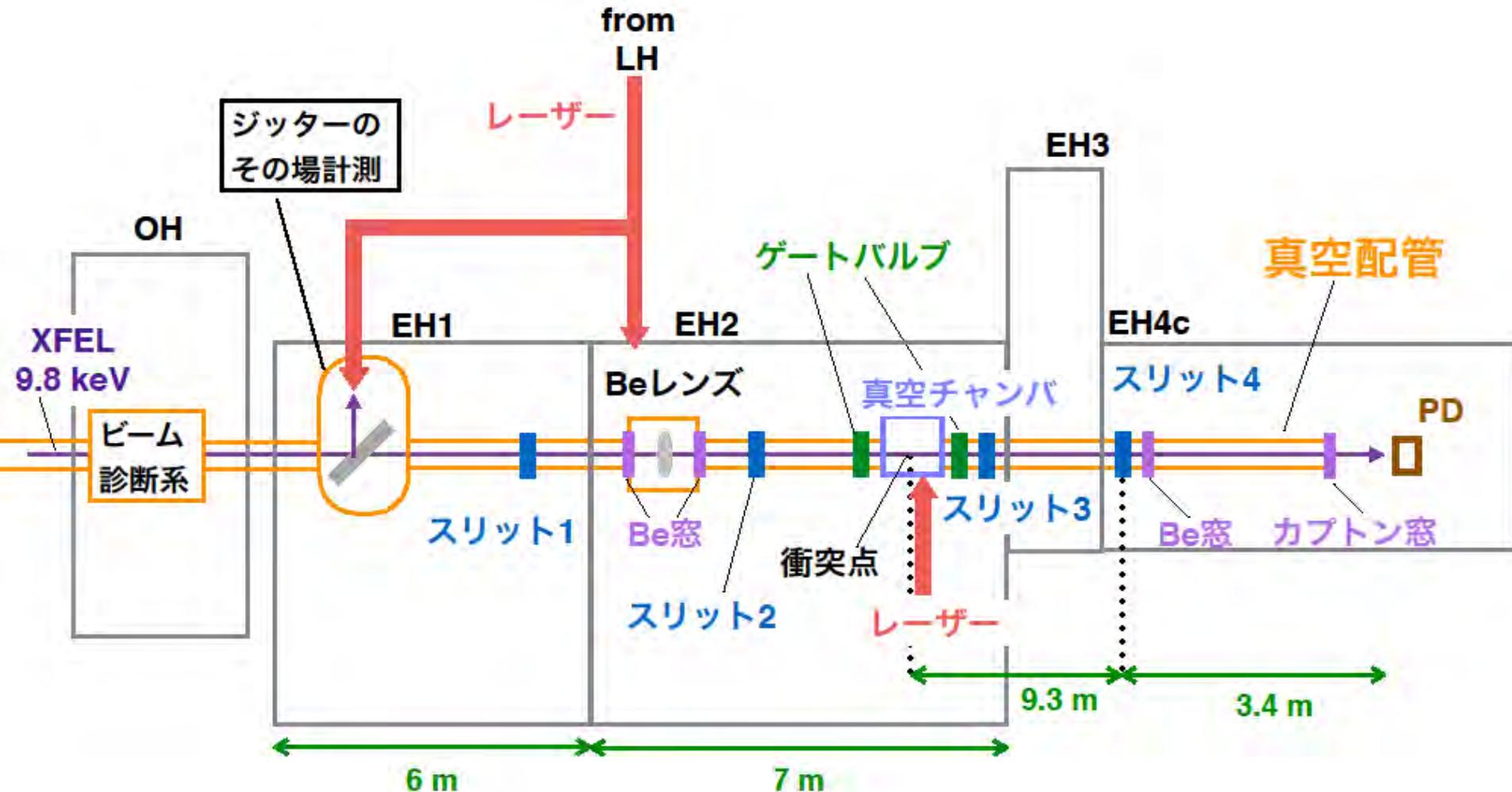
像転送&減光して衝突点でのレーザーの形状・位置をモニター



衝突点チャンバー内の写真



実験セットアップ (全体像)



実験の詳細については次の清野のトーク (18aK33-13) で

まとめ

- SACLAのXFELをprobe光、XFELに同期した500TW x2のレーザーをpump光に用いて、真空の非線形効果の1つである真空回折の探索を行う
- 真空の非線形効果の測定のなかではかなりシグナルが多いという利点があるが、集光や衝突の手法、BG抑制など多くの課題がある。まずは1st stepとして2.5TW 10 μ m集光のpumpレーザーを用いて初の真空回折探索実験を行っている
- 2016年11月にSACLAでXFELと2.5TWレーザーを用いて実験を行った。詳細は次の講演（清野 18aK33-13）で