

X線自由電子レーザー施設 SACLAでの真空回折の探索II

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

東大理, 東大素セ^A, 理研/SPring-8^B, JASRI^C

2016/09/22



内容

これまでのトーク(22pSF-8山道、22pSF-9山崎、22pSF-10稲田)

- ・ SACLAを用いたQEDへのアプローチ
- ・ 真空回折実験概要
- ・ 実験セットアップ

このトーク

- ・ SACLAでのテスト実験
- ・ 今後の展望

SACLAでのテスト実験

SACLAにて真空回折実験のテスト実験を行った

- ・ **ビームタイム**
2016/06 2.5日間
- ・ **各種パラメータ**
XFEL : 9.5keV レーザー : 2.5TW
- ・ **目的**
 - ✓ アライメント手法の確認
 - ✓ 課題の洗い出し
 - ✗ 本測定

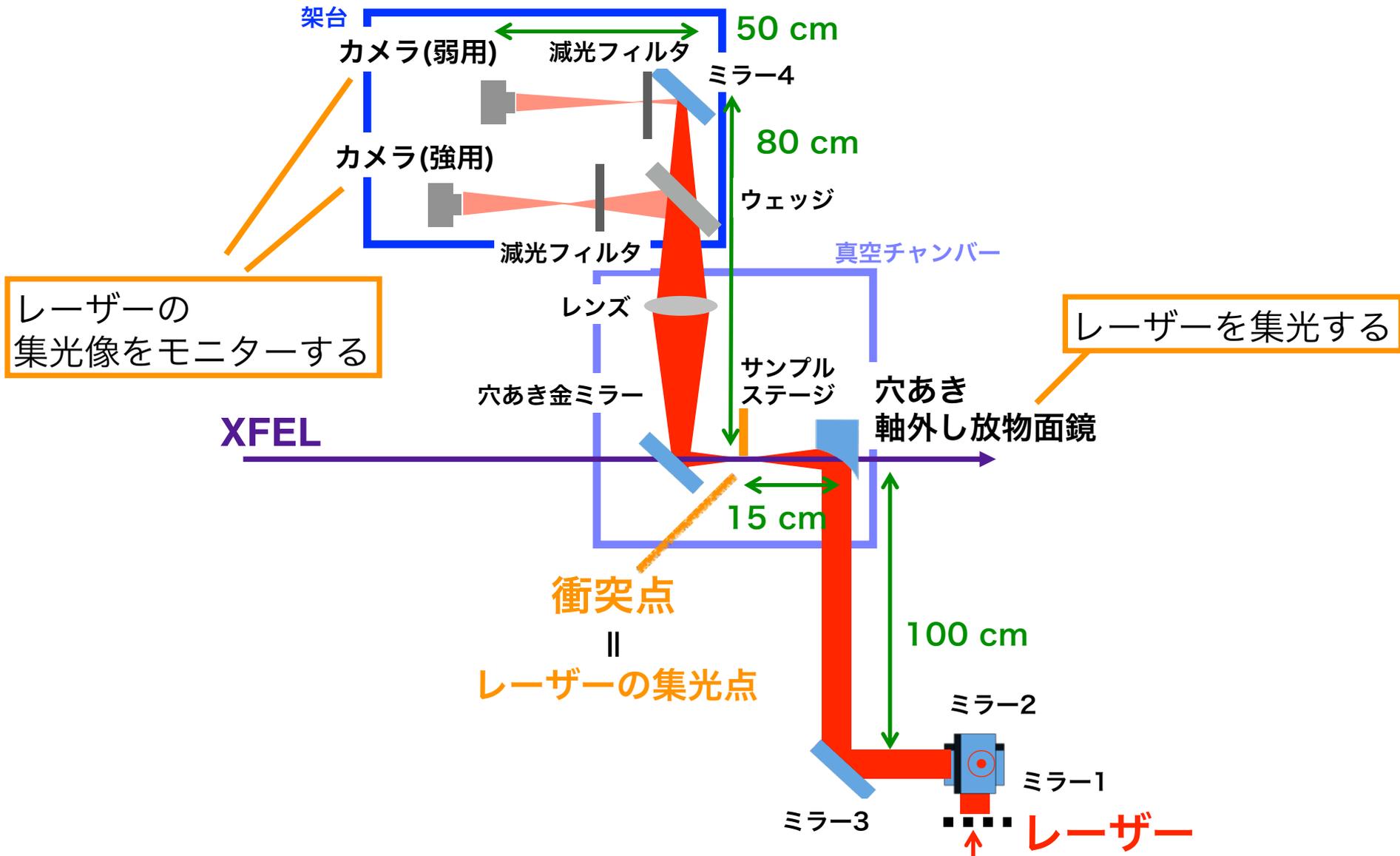


真空回折実験のポイント

本実験のカギは、大きく分けて4つ

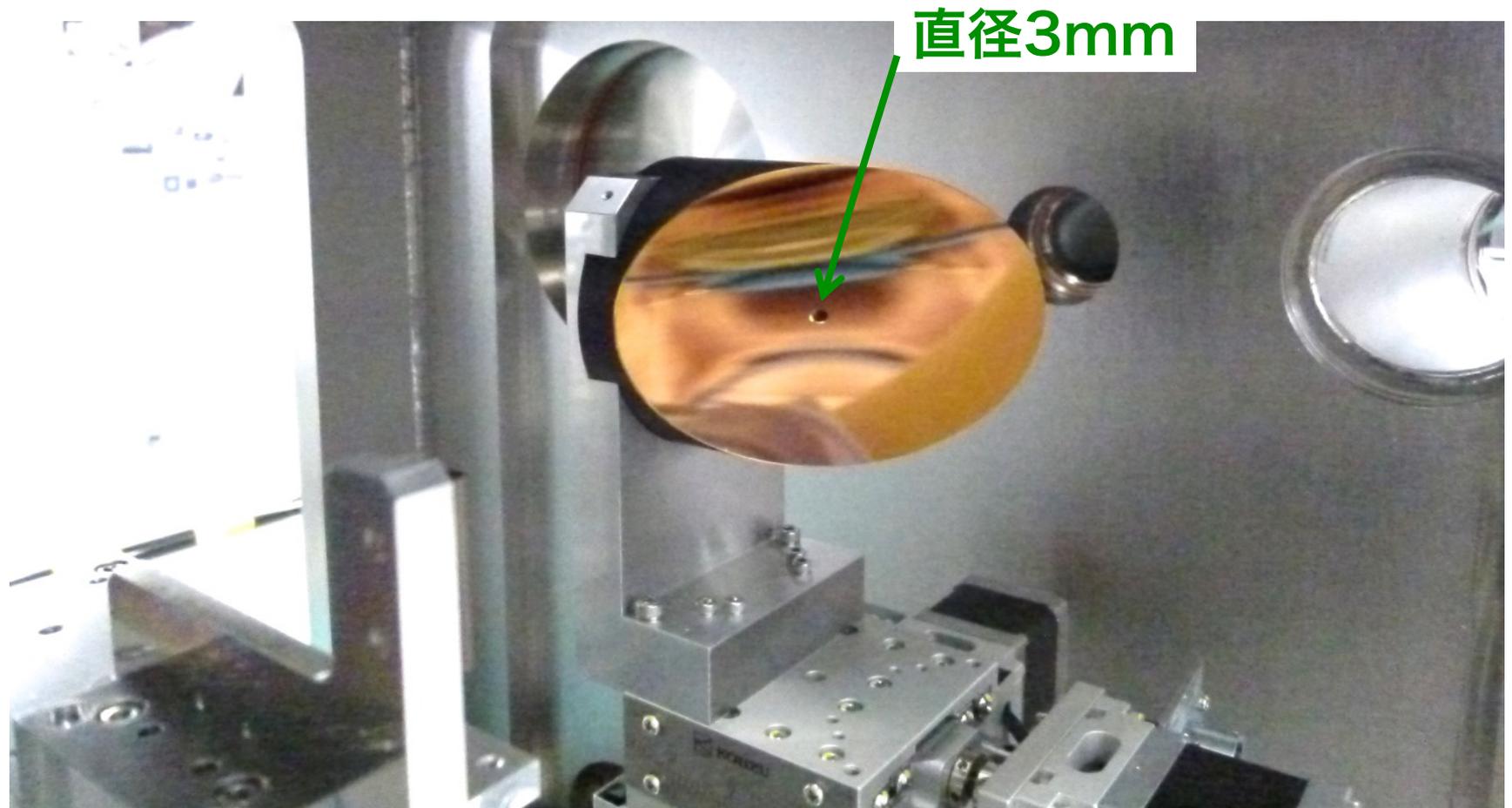
1. レーザーの集光
 - ・ 集光したレーザーで高強度場を作り出す
2. 時間的な衝突の保証(~psの精度)
 - ・ レーザーが集光しているタイミングで衝突していること
3. 空間的な衝突の保証(~ μm の精度)
 - ・ XFELとレーザーのパスが交差していること
(衝突点で中心軸が重なること)
4. スリットによるシグナルの切り出し
 - ・ シグナルのパスを確保&BGを抑制
(テスト実験では検証する時間がなかった)

レーザーの集光と撮像系



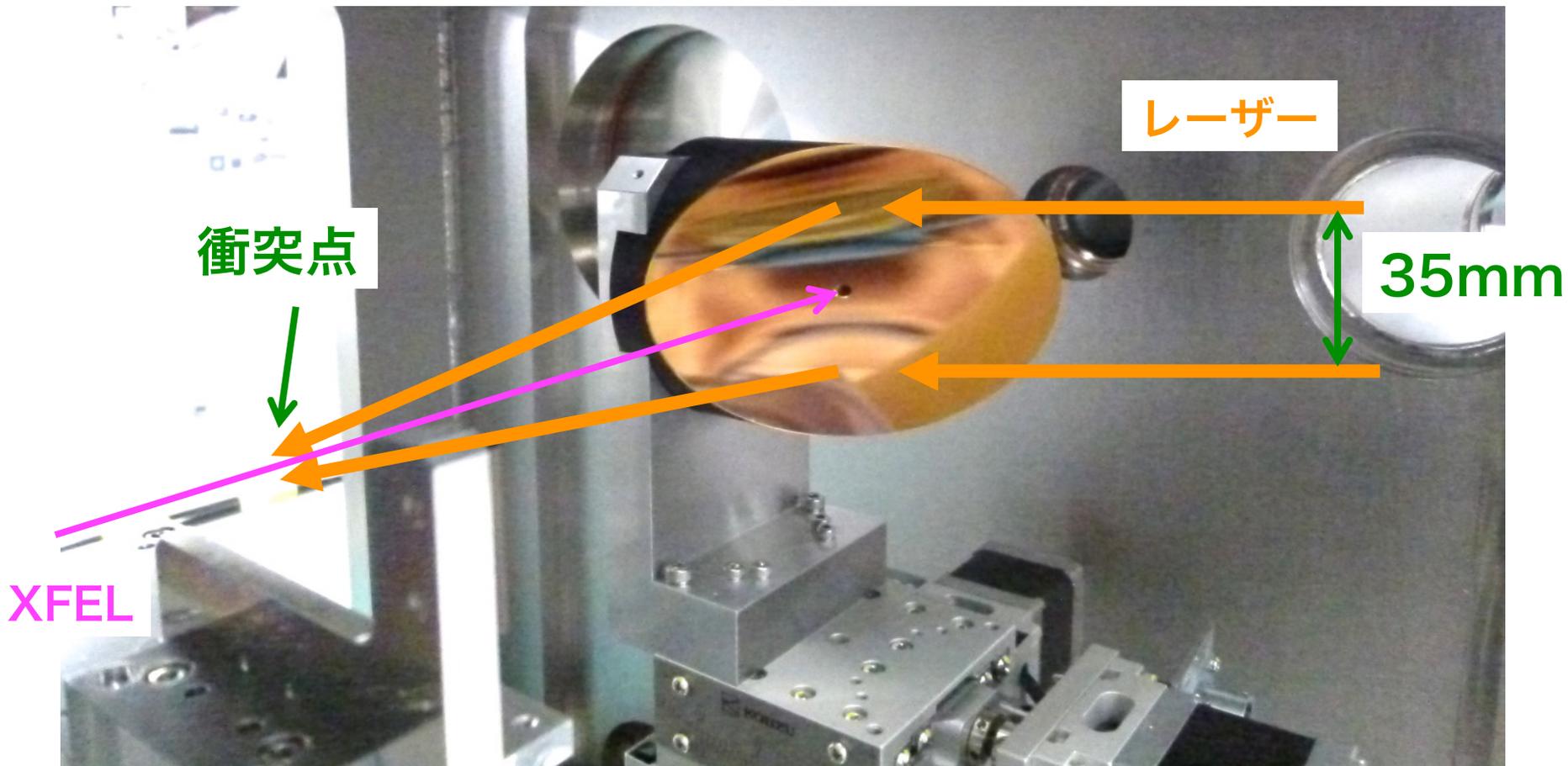
穴あき軸外し放物面鏡

- ・ 穴の開いた放物面鏡でレーザーを集光する
- ・ 穴にはXFELが通る



穴あき軸外し放物面鏡

- ・ 穴の開いた放物面鏡でレーザーを集光する
- ・ 穴にはXFELが通る



放物面鏡での集光に使用する6軸ステージ

真空チャンバ

衝突点

レーザー

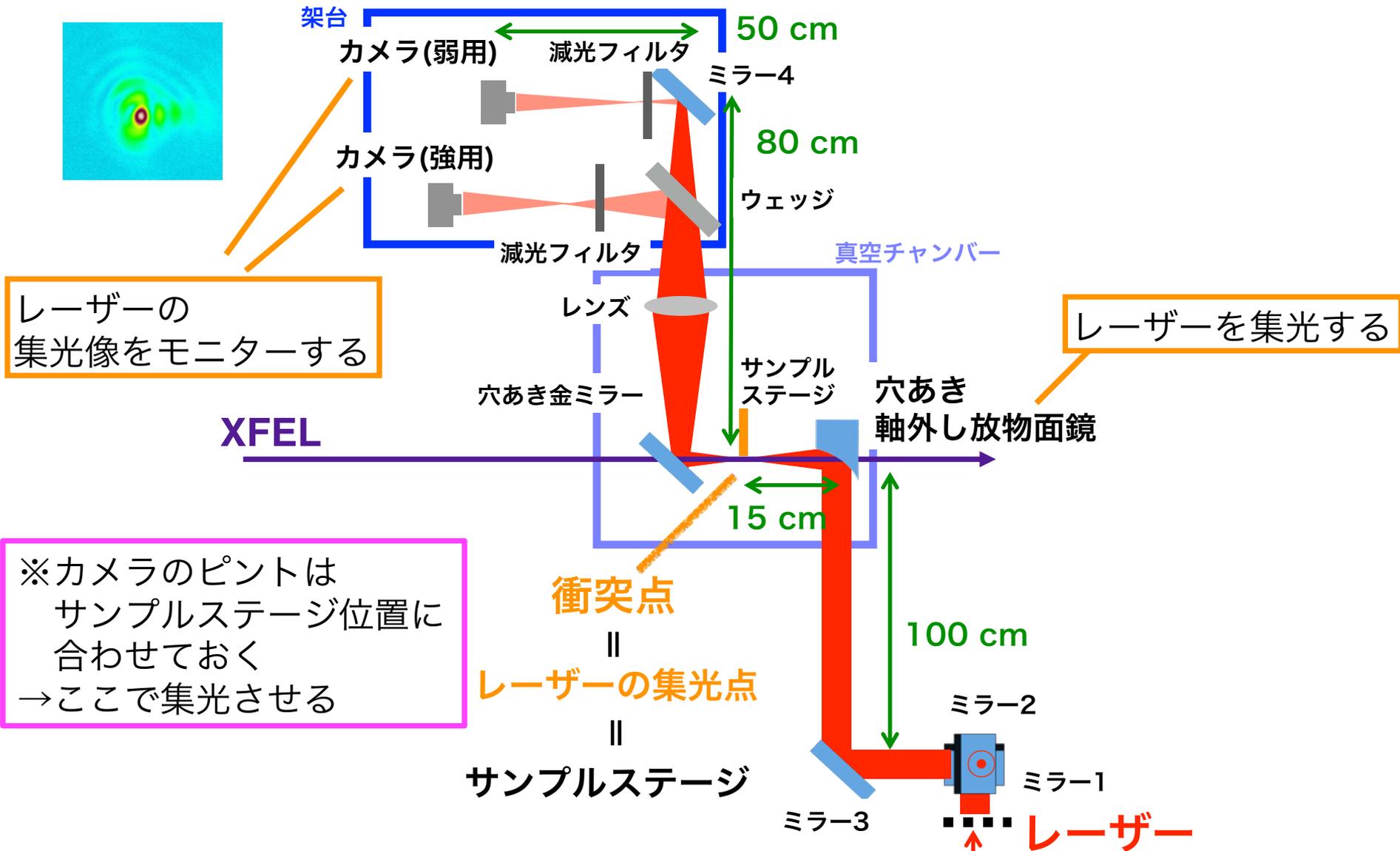
放物面鏡

XFEL

自動ステージ
($x, y, z, \theta, \phi, \chi$)

集光には3並進&3回転の
6軸の調整が必要

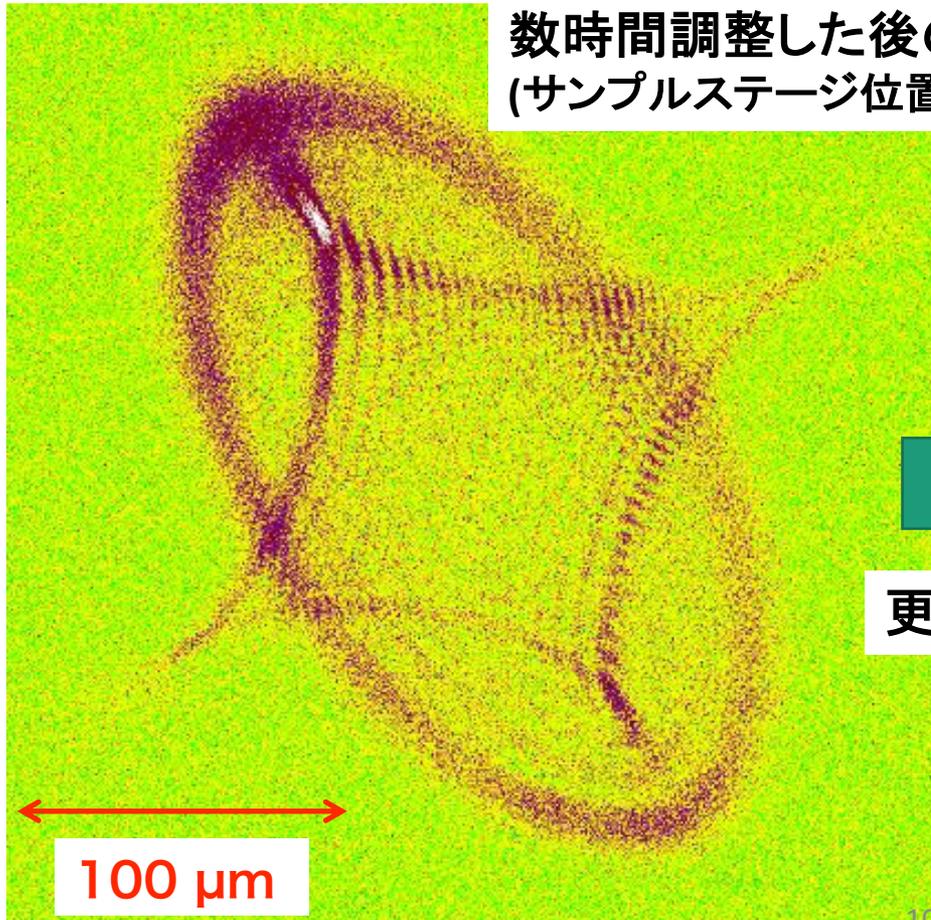
レーザーの集光と撮像系



レーザーの集光

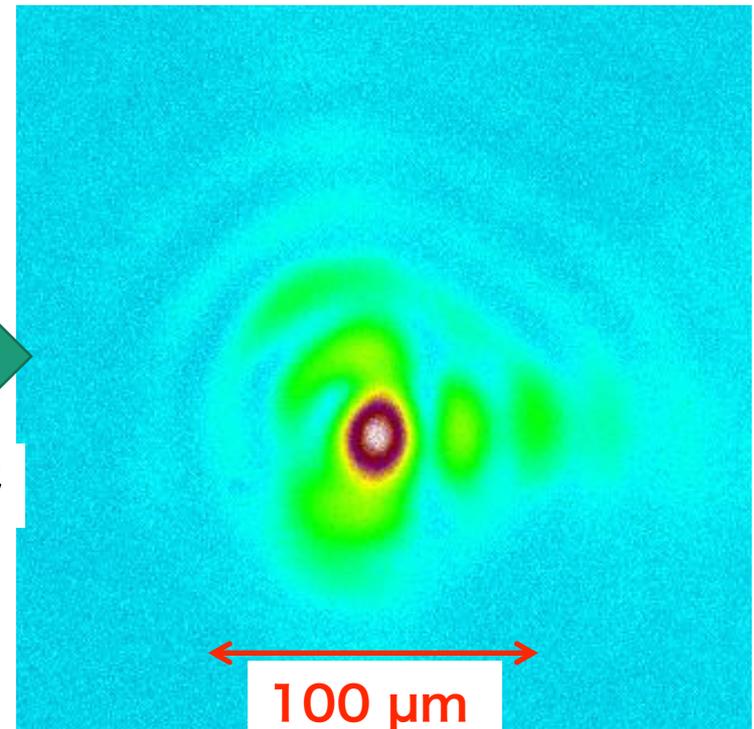
- 集光方法：①レーザーのパワーを弱めた状態で、ミラーの角度を調整して集光する
②レーザーをフルパワーにする

数時間調整した後の像
(サンプルステージ位置の像)



更に調整

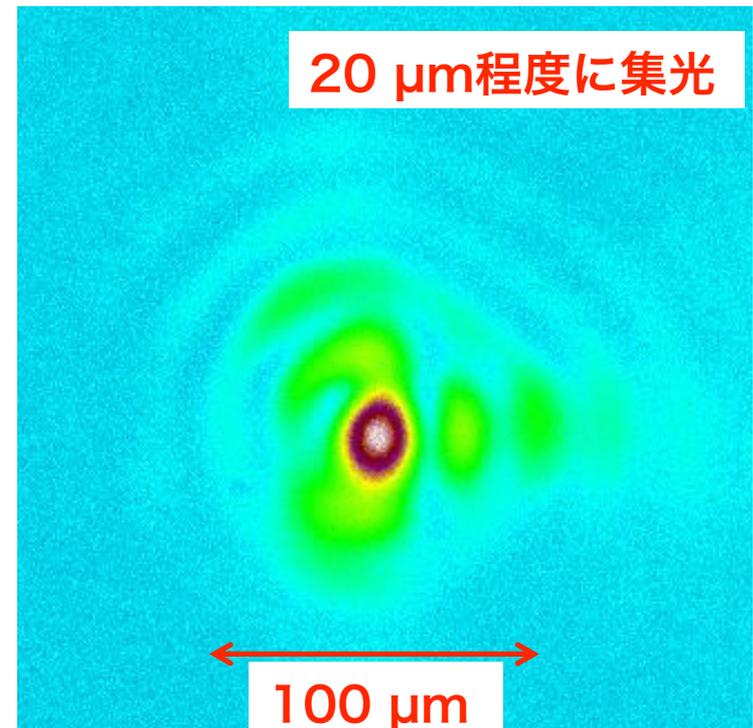
①レーザーのパワーを弱めた状態での集光結果(<1μJ)



レーザーの集光

- 集光方法：①レーザーのパワーを弱めた状態で、ミラーの角度を調整して集光する
②レーザーをフルパワーにする

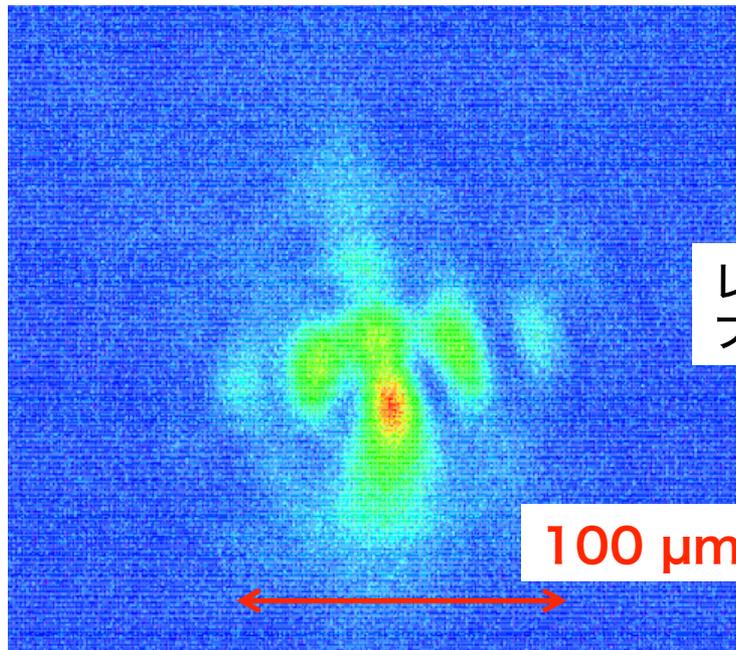
- ①レーザーのパワーを弱めた状態での集光結果($<1\mu\text{J}$)



レーザーの集光

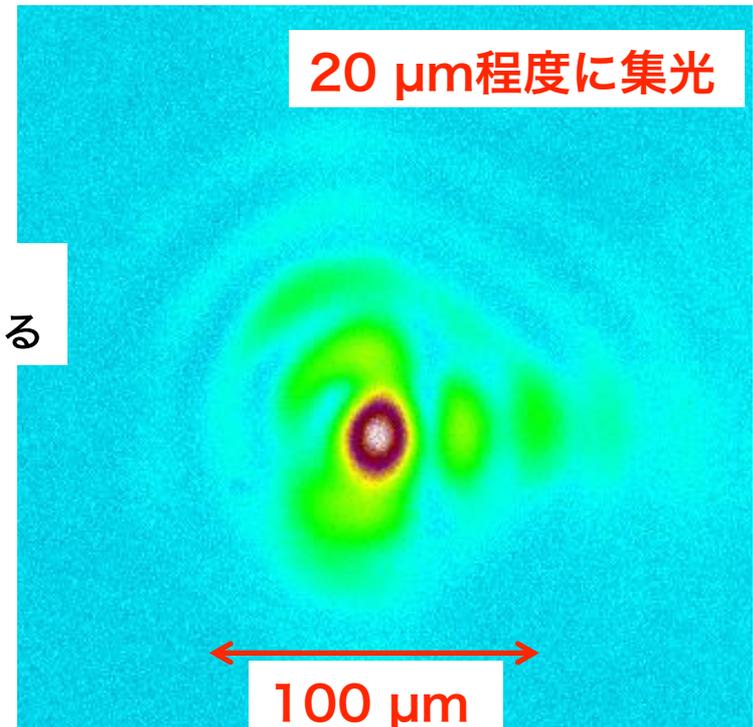
- 集光方法：①レーザーのパワーを弱めた状態で、ミラーの角度を調整して集光する
②レーザーをフルパワーにする

②レーザーフルパワー時の集光像

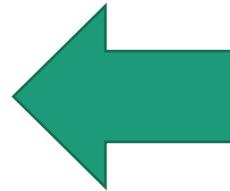


レーザー上流のアライメントミスによりビームプロファイルが乱れた

①レーザーのパワーを弱めた状態での集光結果(<1μJ)



レーザーをフルパワーにする



レーザーとXFELのタイミング合わせの原理

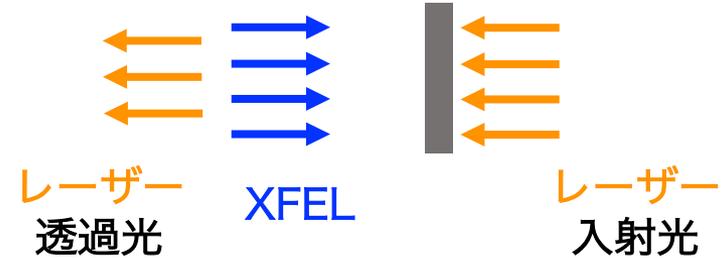
タイミング合わせの原理

GaAs薄膜にXFELを入射すると、
内殻から電子が飛び出てプラズマのようになる

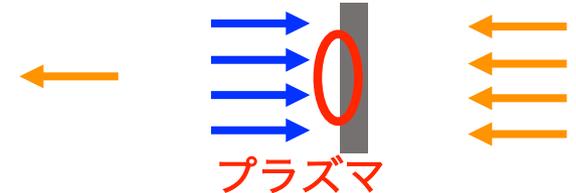
プラズマは光を通さないため、
XFELの入射直後にレーザーが入射すると
レーザーの透過率が下がる

→レーザーの透過率からタイミングがわかる

レーザーが先に入射 GaAs薄膜



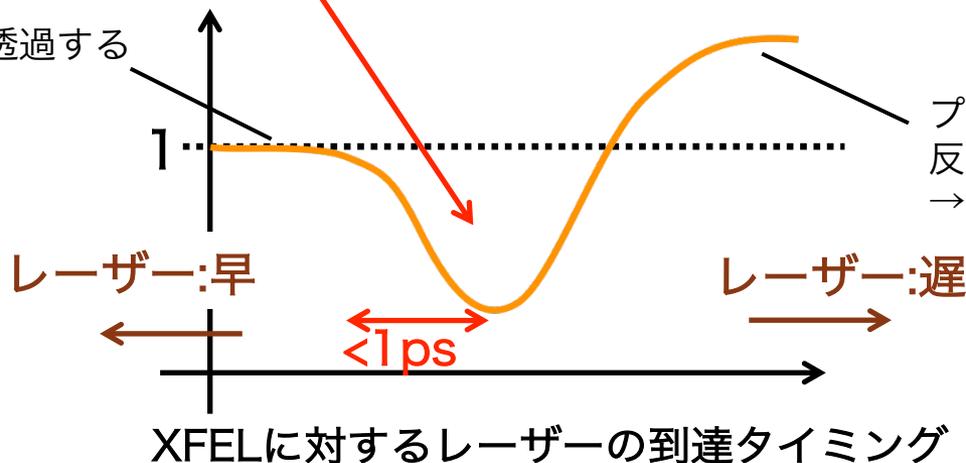
レーザーが後に入射 ← 5μm



谷の位置=同時入射

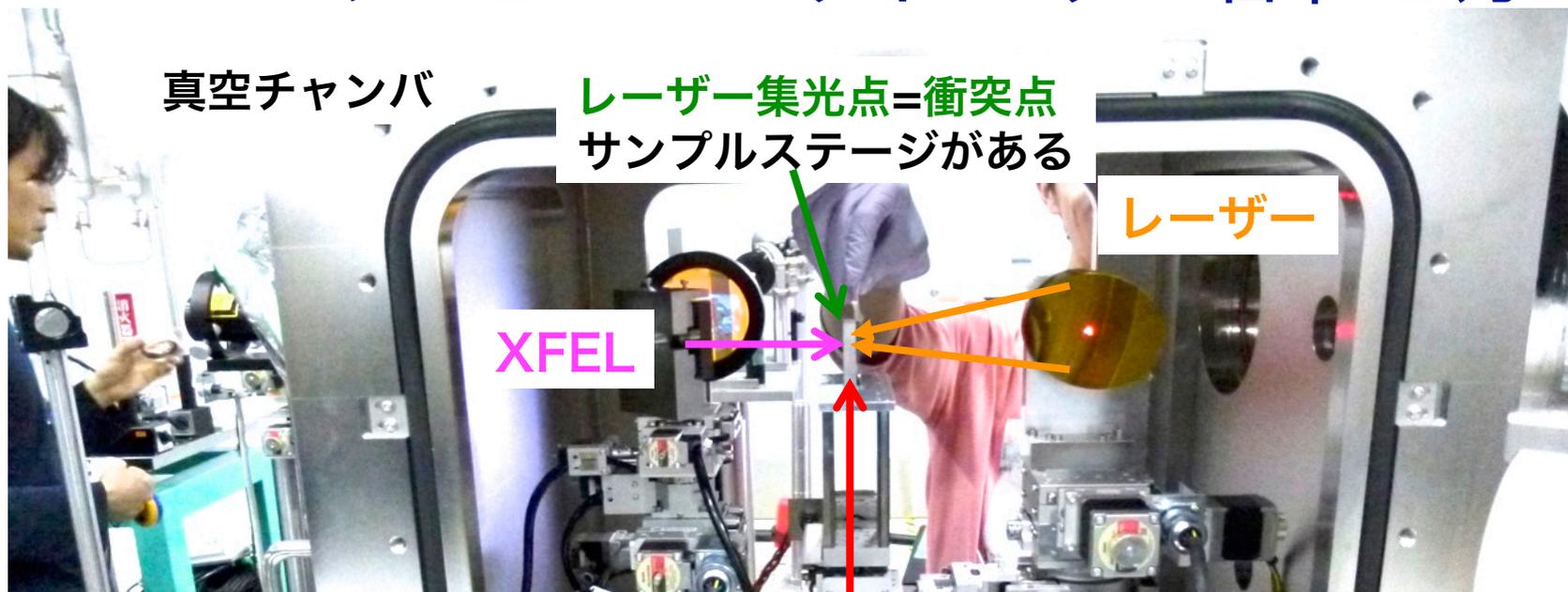
レーザーの透過率

ただレーザーが透過する
だけなので1



プラズマ化した電子が落ちてきて
反転分布のようなものを作る
→レーザー入射で増幅が起きる

レーザーとXFELのタイミングの合わせ方



真空チャンバ

レーザー集光点=衝突点
サンプルステージがある

レーザー

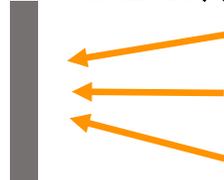
XFEL

GaAs薄膜

カメラ
レーザーの透過率を測定



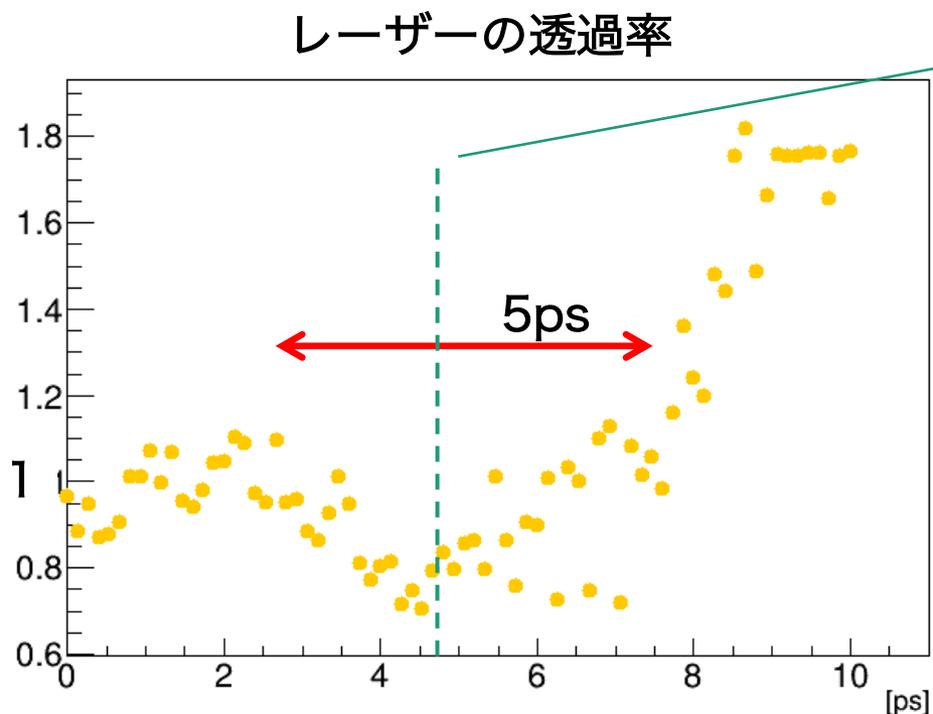
XFEL



レーザー
照射タイミングを変える

サンプルステージ=レーザーの集光点にGaAs薄膜を置く
→レーザーの集光点で、XFELとレーザーのタイミングを合わせる

レーザーとXFELのタイミングの保証



この位置を同時入射の
タイミングとする
→精度は悪くても $\pm 2.5\text{ps}$

レーザー:早



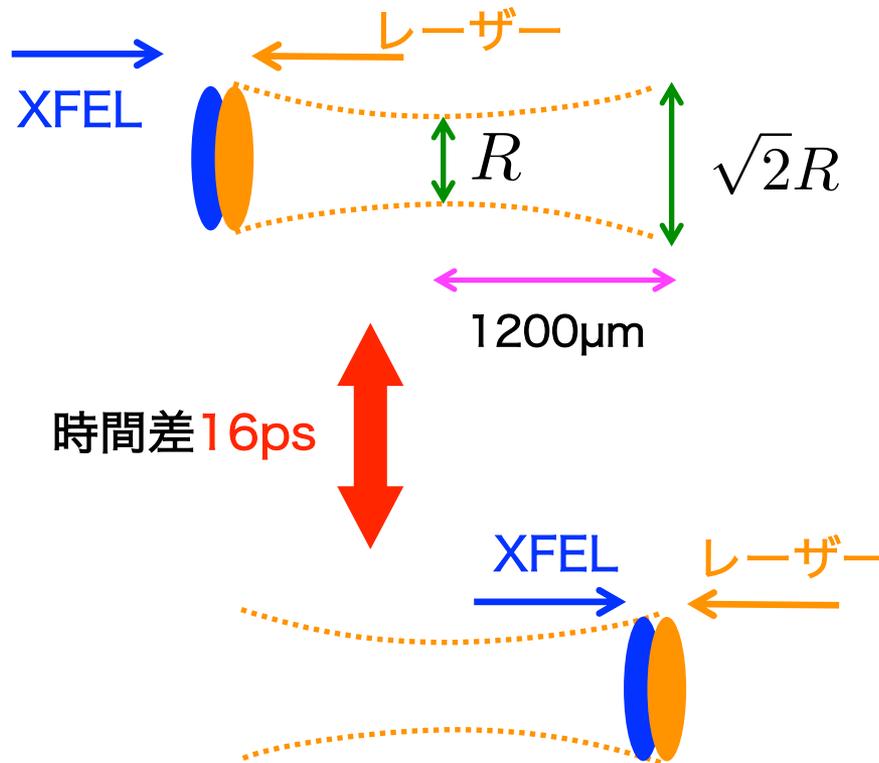
レーザー:遅



XFELに対するレーザーの到達タイミング

タイミング保証の要求精度

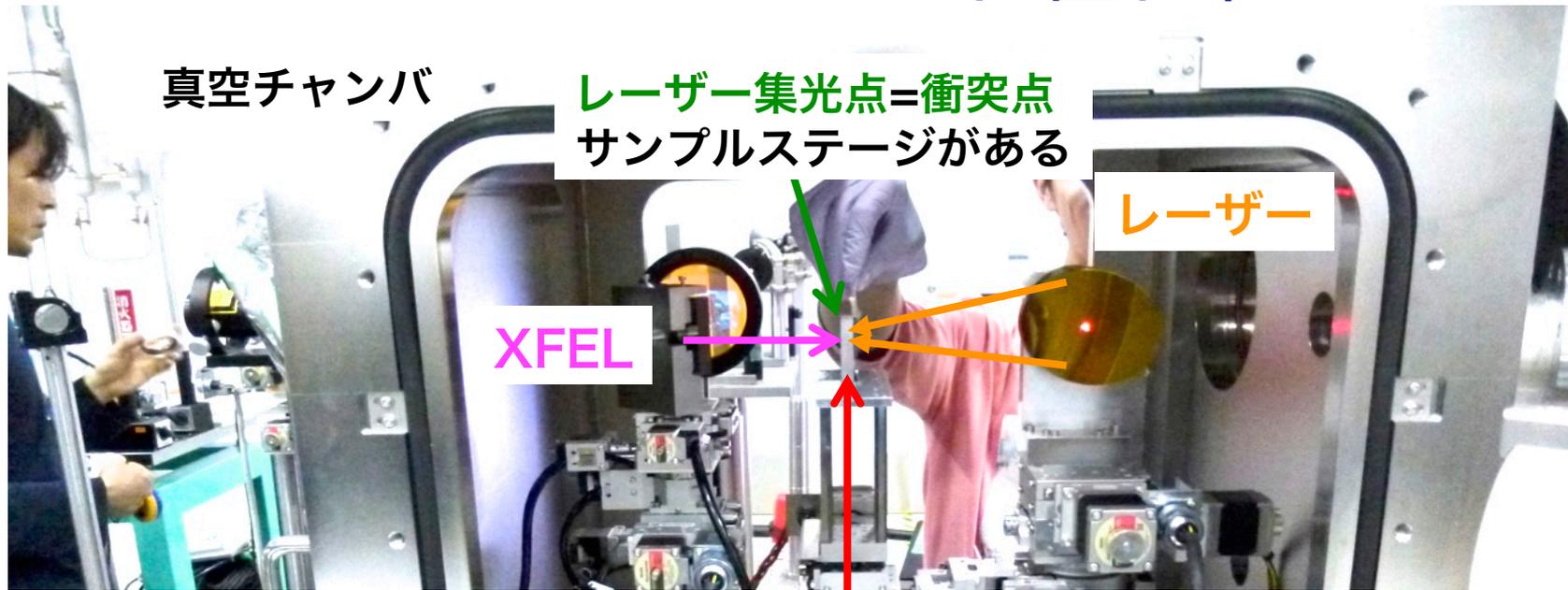
衝突点の、レーザーの集光点からのずれがどの程度許容できるか考える



- レーザーの径が $\sqrt{2}$ 倍になる長さ
: レーザーの集光径 R の2乗に比例
ex) $R=20\mu\text{m} \rightarrow 1200\mu\text{m}$
 $R=1\mu\text{m} \rightarrow 40\mu\text{m}$

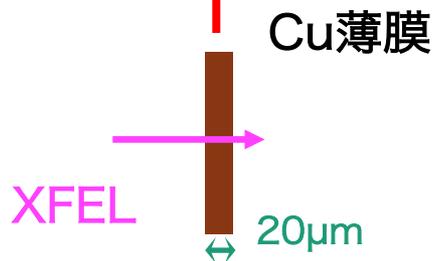
今回の設置精度 $\pm 2.5\text{ps}$ 以下
許容出来る時間差 $\pm 8\text{ps}$
→この精度で十分設定出来ている

レーザーとXFELの位置合わせ



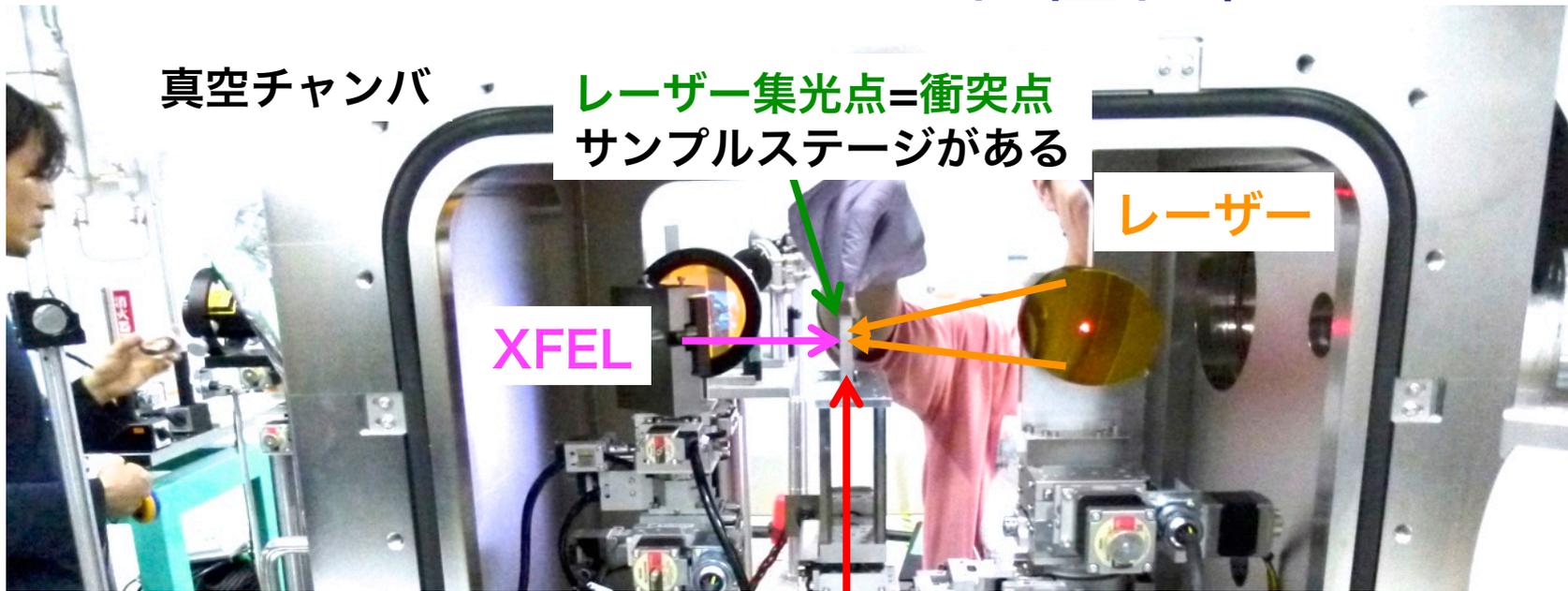
1.

カメラ



1. サンプルステージに**Cu薄膜**(20 μm)を置き、XFELで穴を開ける
2. 穴の位置をカメラで見て、場所(ピクセル数)を記録
3. Cu薄膜を取り除き、レーザーの集光像が記録した穴の位置に来るようにミラーを調整

レーザーとXFELの位置合わせ



2.

カメラ



~30 μm

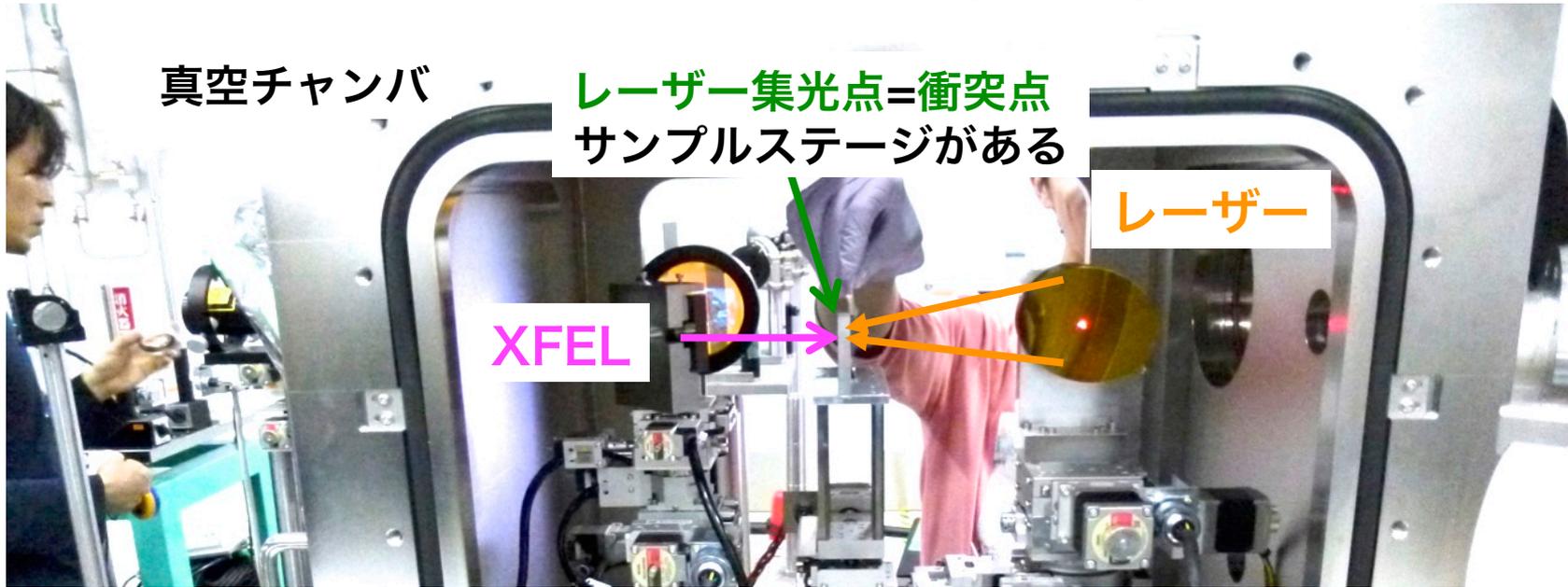
Cu薄膜



20 μm

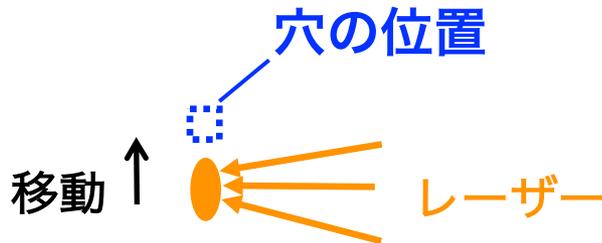
1. サンプルステージにCu薄膜(20 μm)を置き、XFELで穴を開ける
2. **穴の位置**をカメラで見て、場所(ピクセル数)を記録
3. Cu薄膜を取り除き、レーザーの集光像が記録した穴の位置に来るようにミラーを調整

レーザーとXFELの位置合わせ



3.

カメラ

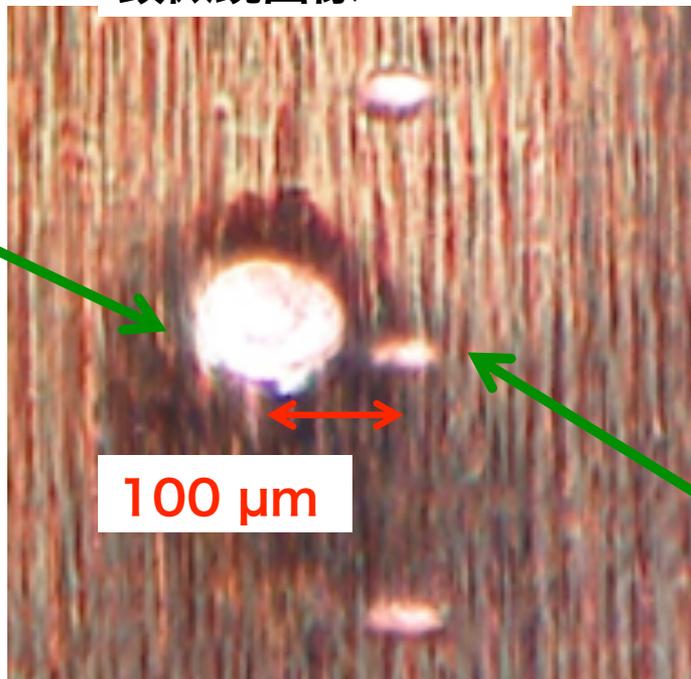


1. サンプルステージにCu薄膜(20 μm)を置き、XFELで穴を開ける
2. 穴の位置をカメラで見て、場所(ピクセル数)を記録
3. Cu薄膜を取り除き、レーザーの集光像が記録した穴の位置に来るようにミラーを調整

レーザーとXFELの衝突位置の保証

- ・ 衝突点位置にCu薄膜(20 μm)を設置し、
レーザーとXFELを同時入射する
- ・ 照射痕の位置を見比べ、レーザーとXFELの入射位置を確認する

Cu薄膜(20 μm)の
顕微鏡画像



- ・ レーザーとXFELには100 μm のずれがあった
レーザー上流のアライメントミスが原因か
- ・ 再度アライメントを行う
時間がなかった
- ・ XFELでは穴を貫通させる予定
- ・ 穴の重なりから、数 μm 程度の位置精度は出ると考えている

XFEL照射痕
表側から照射
XFEL自体
のサイズ: 20 μm × 40 μm

真空回折実験の課題

次回のビームタイムに向けての課題

- ・ **レーザーの集光**
→最初の目標の20 μm は達成
- ・ **タイミング合わせ**
→今回の集光サイズではOK
- ・ **位置合わせ**
→他のアライメント時間を短縮することで、ずれを補正する時間を確保
- ・ **シグナルの切り出し**
今回のビームタイムでは、スリットの設置によってシグナルを切り出せるか(BGをどこまで落とせるか)検証する時間がなかった
→SPring-8で予備実験を行う
※スリット間の間隔：~10m スリットの幅：~100 μm

今後の予定

10月 SPring-8ビームタイム (3日間)

- ・ シグナルを切り出すスリットの設置方法の検証等の予備実験を行う

11月 SACLAビームタイム (2.5日間)

- ・ 前回の実験で確立した方法でアライメント時間を短縮させる
- ・ 成功すると、真空回折を検証する**初めての実験**となる
- ・ 感度はQED理論値の8桁下

来年度以降

- ・ 現在SACLAでは、500TWレーザーをインストール中
- ・ このレーザーを $1\mu\text{m}$ に集光して実験を行うと、**感度はQED理論値に達する**
- ・ 500TWレーザーを用いて真空回折実験を行い、QEDで予言される**真空回折現象の初観測**を行う

まとめ

- 非一様な高強度電磁場中では、光が伝播する際に回折が起こることがQEDで予言されているが、未検証
- 本実験では高強度電磁場を2.5 TWレーザーで生成し、SACLAのXFELを入射させて真空回折を観測する
- 今回のビームタイムではアライメントに時間がかかり、レーザーとXFELを衝突させることが出来なかった
- 11月のビームタイムでは、今回確立したアライメント方法を駆使して時間を短縮し、真空回折の初検証を行う
- 来年度以降に、SACLAの500 TWレーザーを用いて実験を行い、QEDで予言される真空回折の初観測を行う