

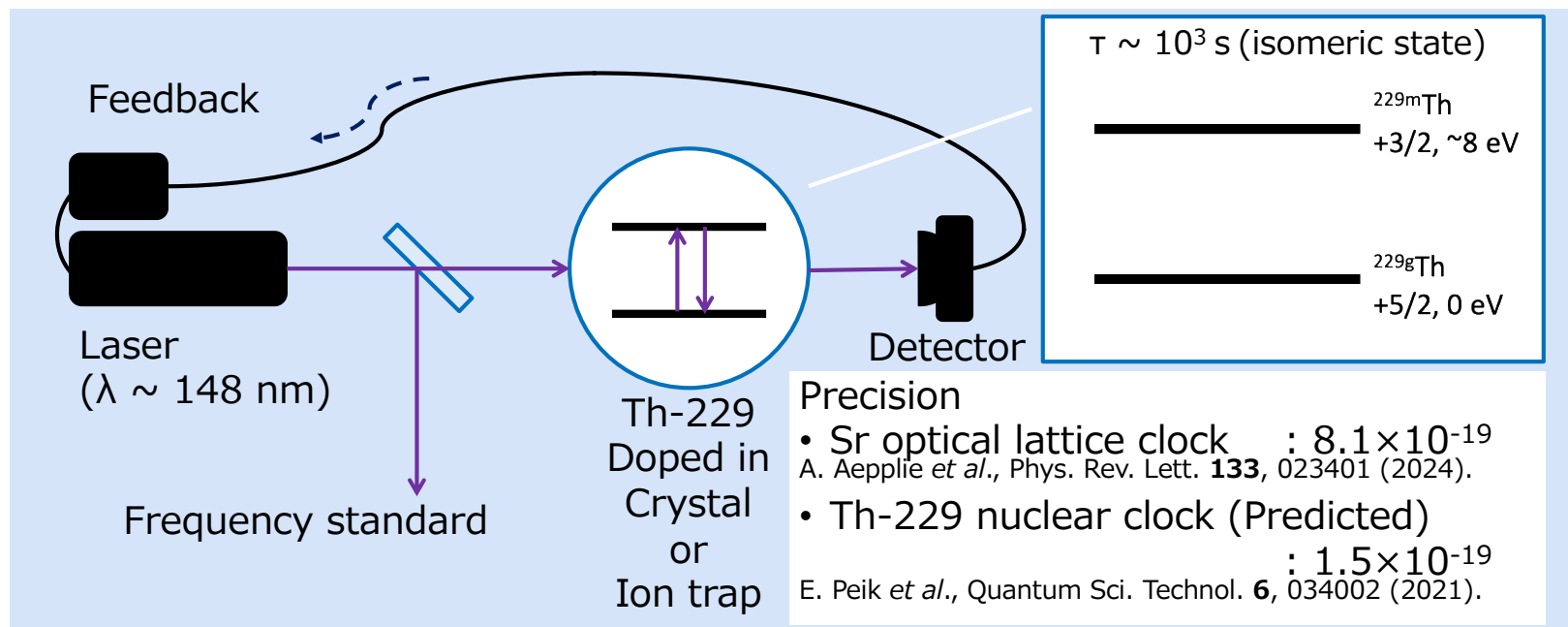
清水 航太郎

岡山大学大学院, 量子宇宙研究コア, M2

# Th-229原子核時計実現に向けた真空紫外レーザー開発

# トリウム229(Th-229) アイソマー

- 長い半減期:  $\sim 10^3$  sec
- 全ての原子核の中で最も低いエネルギーの励起準位:  $\sim 8$  eV  
→ 真空紫外 (VUV) 領域
- 期待される応用例
  - 原子核時計



- 物理定数の恒常性の確認
- 新物理の探索

Expected new physics exploration using the Th-229 isomer

# これまでの研究

1976	数eVの準位の存在を示唆	L. A. Kroger and C. W. Reich, Nucl. Phys. A <b>259</b> , 1 (1976).
2016	アイソマーの存在を確認	L. Wense et al., Nature <b>533</b> , 47 (2016).
2019	アイソマーの人工的生成	T. Masuda et al., Nature <b>573</b> , 238 (2019).
2023	アイソマーからの脱励起光観測	S. Kraemer et al., Nature <b>617</b> , 706 (2023). S. Hiraki et al., Nature Communications <b>15</b> , 5536 (2024).
2024	レーザー励起に成功	■

## ■ レーザー励起 (線幅)

2024 PTB 6 GHz

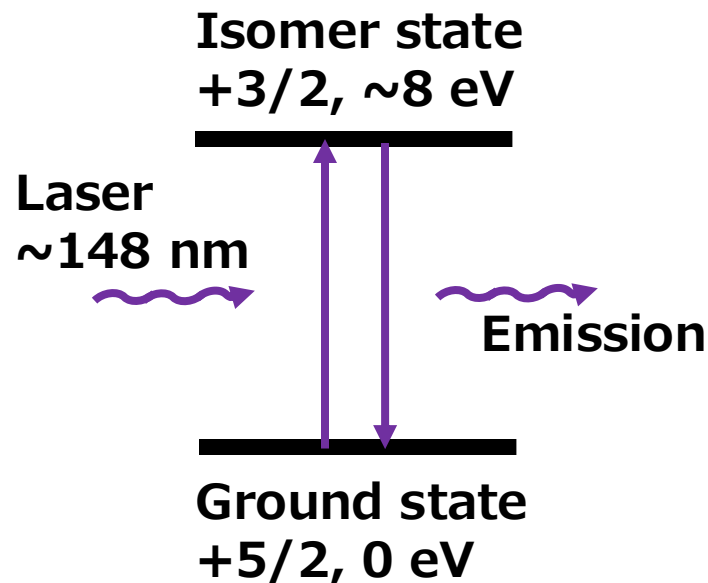
J. Tiedau *et al.*, Phys. Rev. Lett. **132**, 182501 (2024).

2024 UCLA 15 GHz

R. Elwell *et al.*, Phys. Rev. Lett. **133**, 013201 (2024).

2024 JILA 300 kHz  
(コムスペーシング 75 MHz)

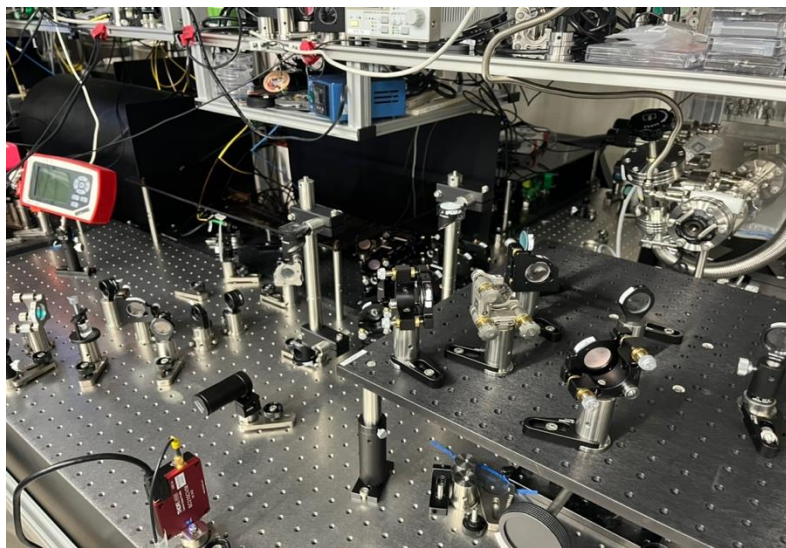
C. Zhang *et al.*, Nature **633**, 63 (2024).



ついにレーザーによるアイソマー直接励起成功が報告された

# 研究目標

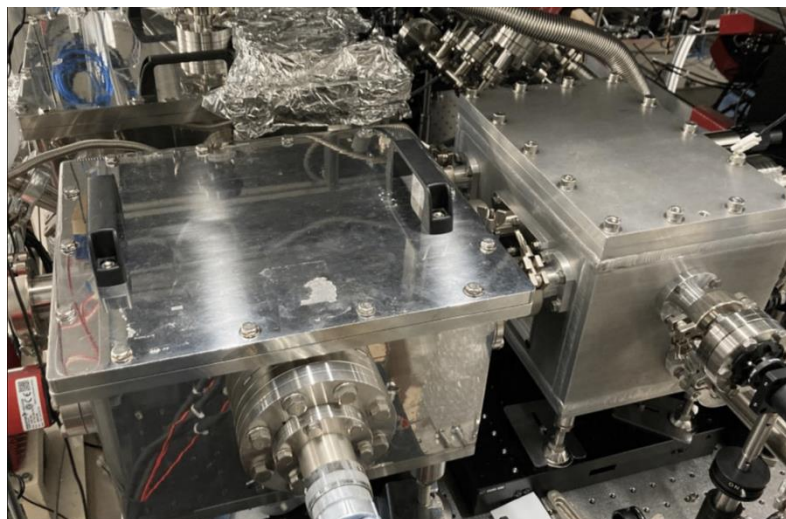
O(10) MHz 狭線幅レーザー



*This study*

+

高い背景事象除去性能の検出器



T. Hiraki *et al.*, Nature Communications **15**, 5536 (2024).

M. Guan *et al.*, Nucl. Instrum. Method B, (accepted).

VUVパルスレーザーを開発して、アイソマー直接励起と結晶場分裂によるスペクトルの観測を目指す

# レーザー開発目標

## ■ VUVレーザーの開発は困難

- 酸素に吸収されるため空気中では開発不可
- 148 nm用の適当なレーザー媒質は未開発

→ Xeガスを用いた四光波混合

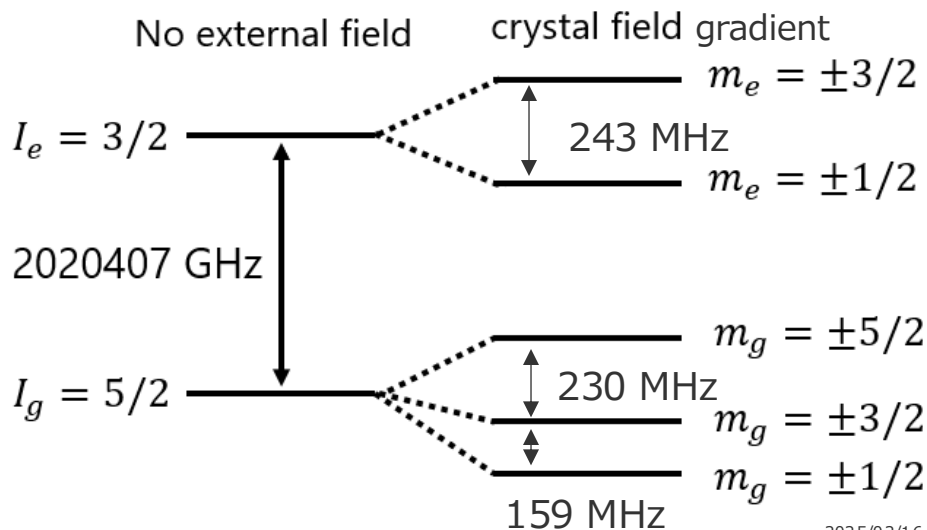
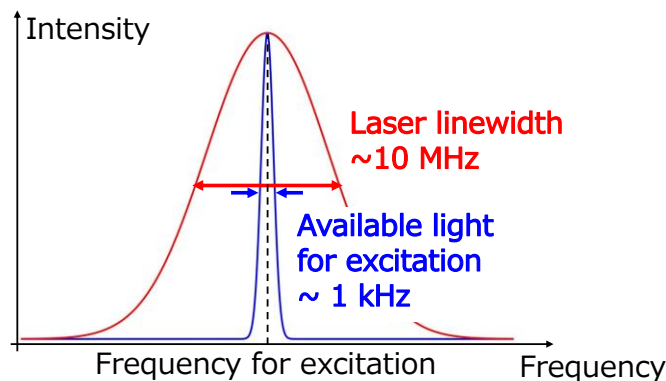
## ■ パルスエネルギー・線幅と生成されるアイソマー数

- 1パルス照射で生成されるアイソマー数  
(パルスエネルギー:  $10^{-2}$   $\mu\text{J}$ , 線幅: 10 MHz)  
 $7.5 \times 10^5$  [/pulse] (1 pulse = 0.1 s)

→ 結晶場分裂の観測が可能な線幅

- 過去の分光実験において放射光X線を用いて生成されたアイソマー数  
 $1.6 \times 10^5$  [/set] (1 set = 600 s)

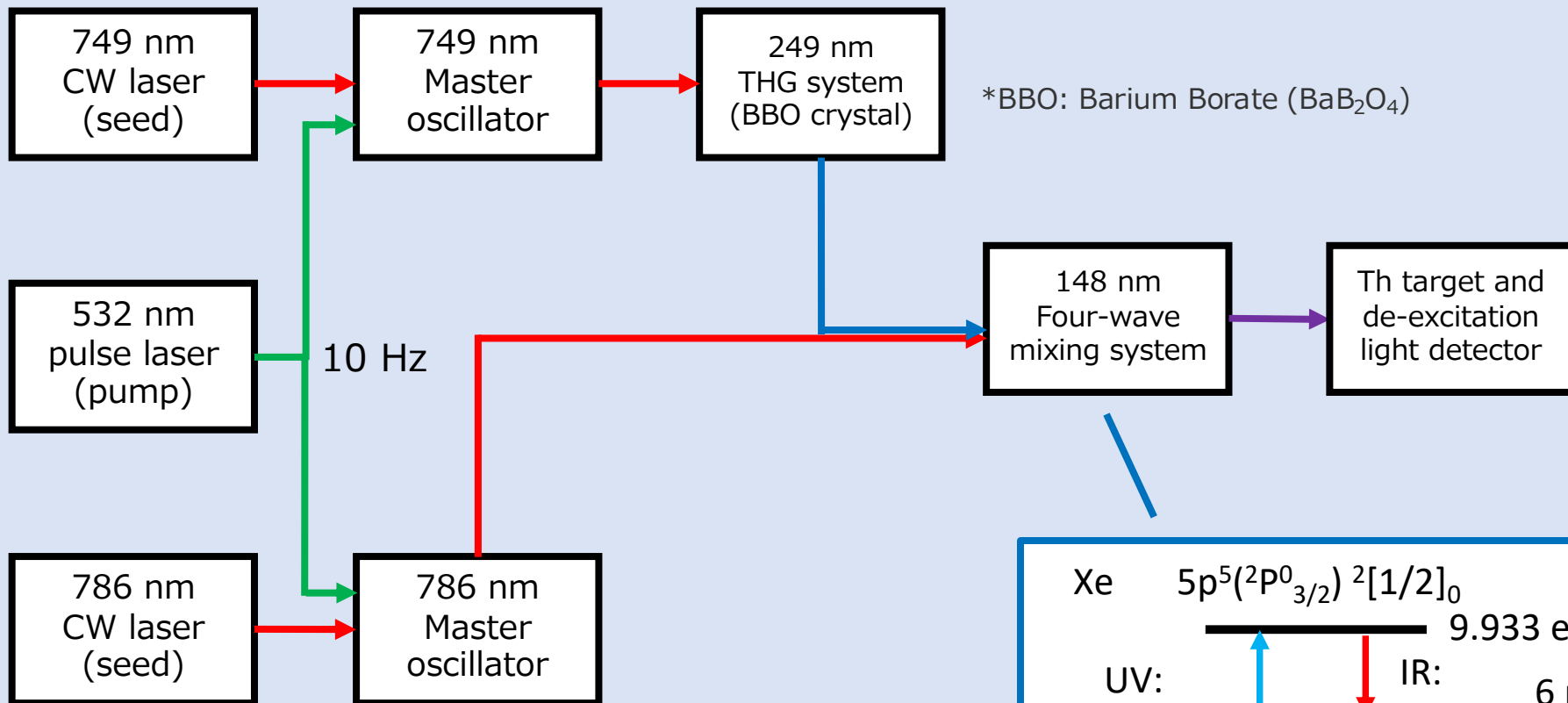
→ 同じ検出器で検出可能



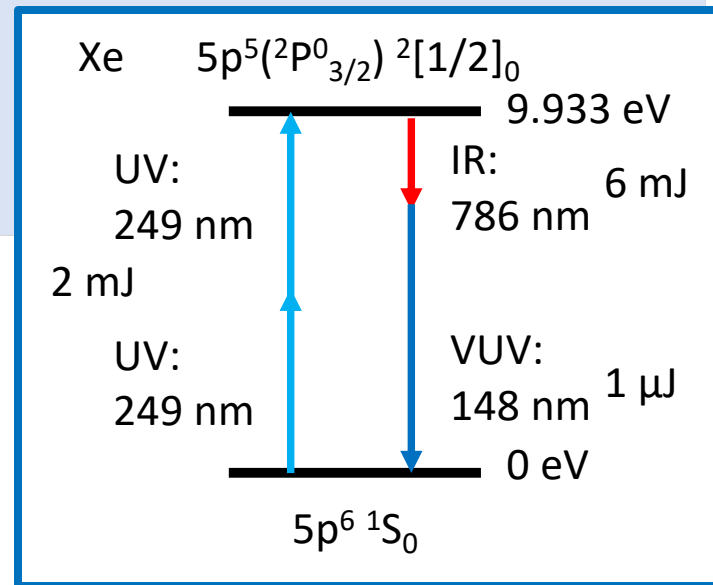
## VUVパルスレーザー開発目標

- パルスエネルギー  $O(10^0)$  [ $\mu\text{J}$ ]
- 線幅  $O(10)$  [MHz]
- 波長  $\sim 148$  [nm]

# レーザーシステムの概略図

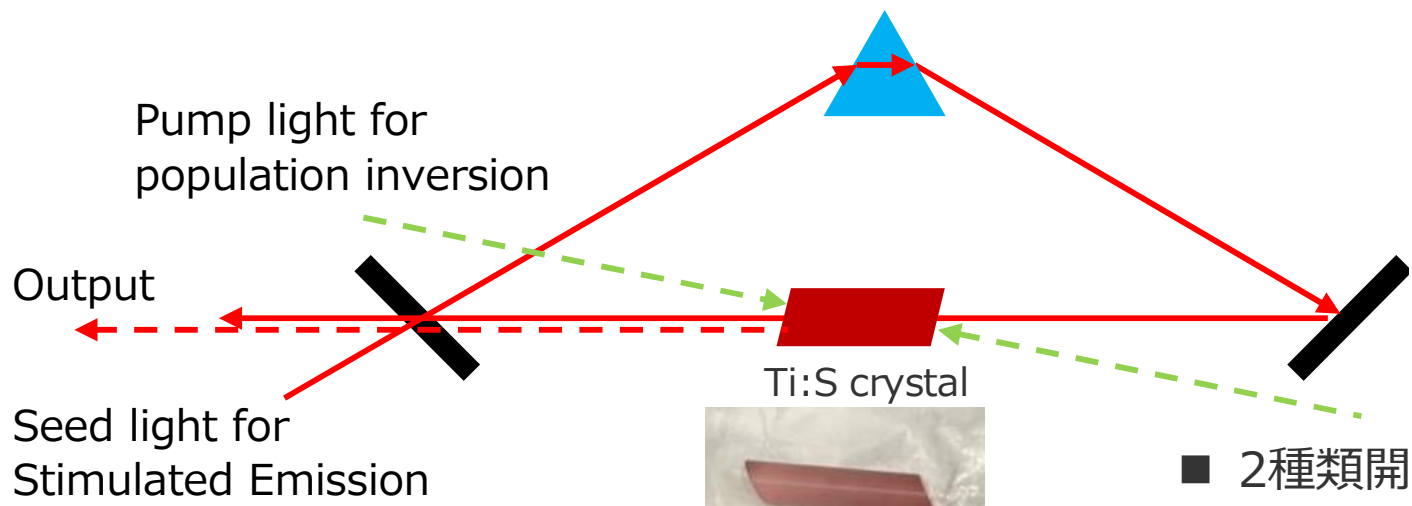


- 主なコンポーネント
- マスターオシレーター → 詳細に説明
- 第3高調波発生 (THG) システム
- 四光波混合システム



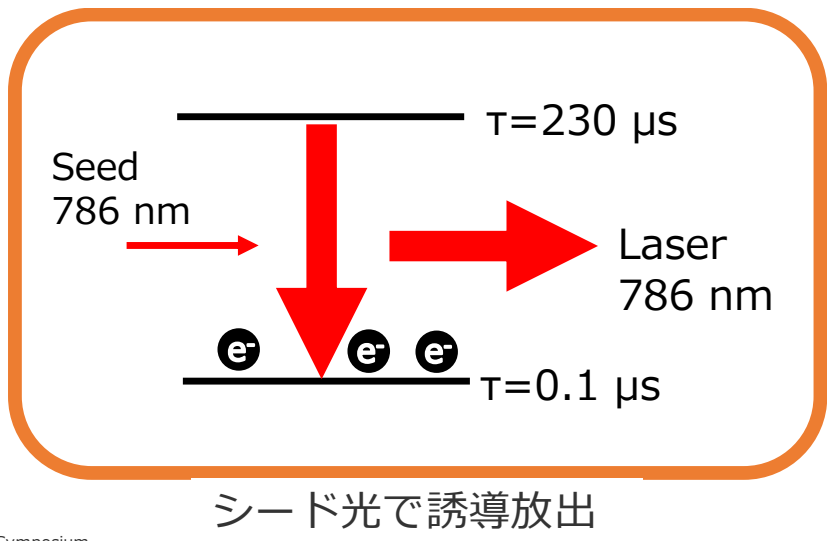
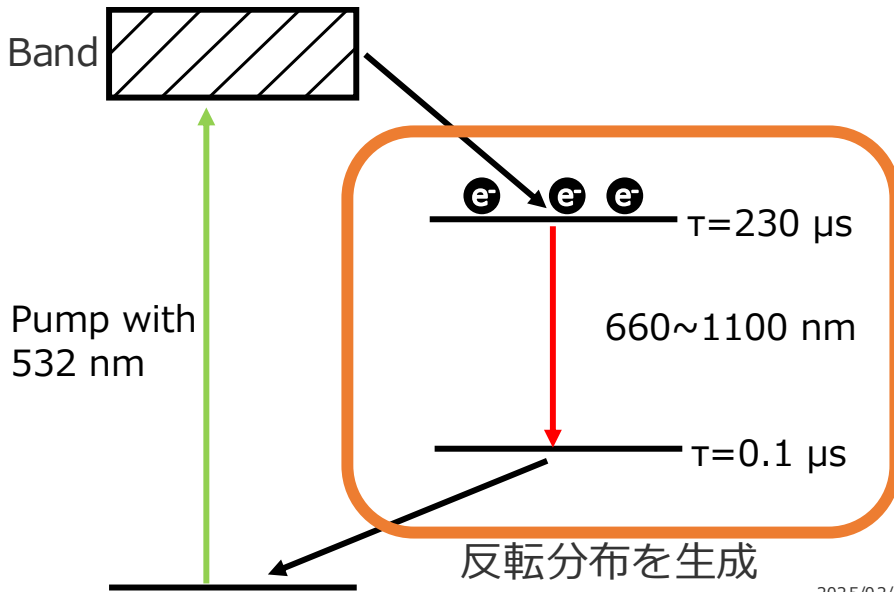
# マスターオシレーター

## ■ パルスレーザーの生成方法 - インジェクションシーダー

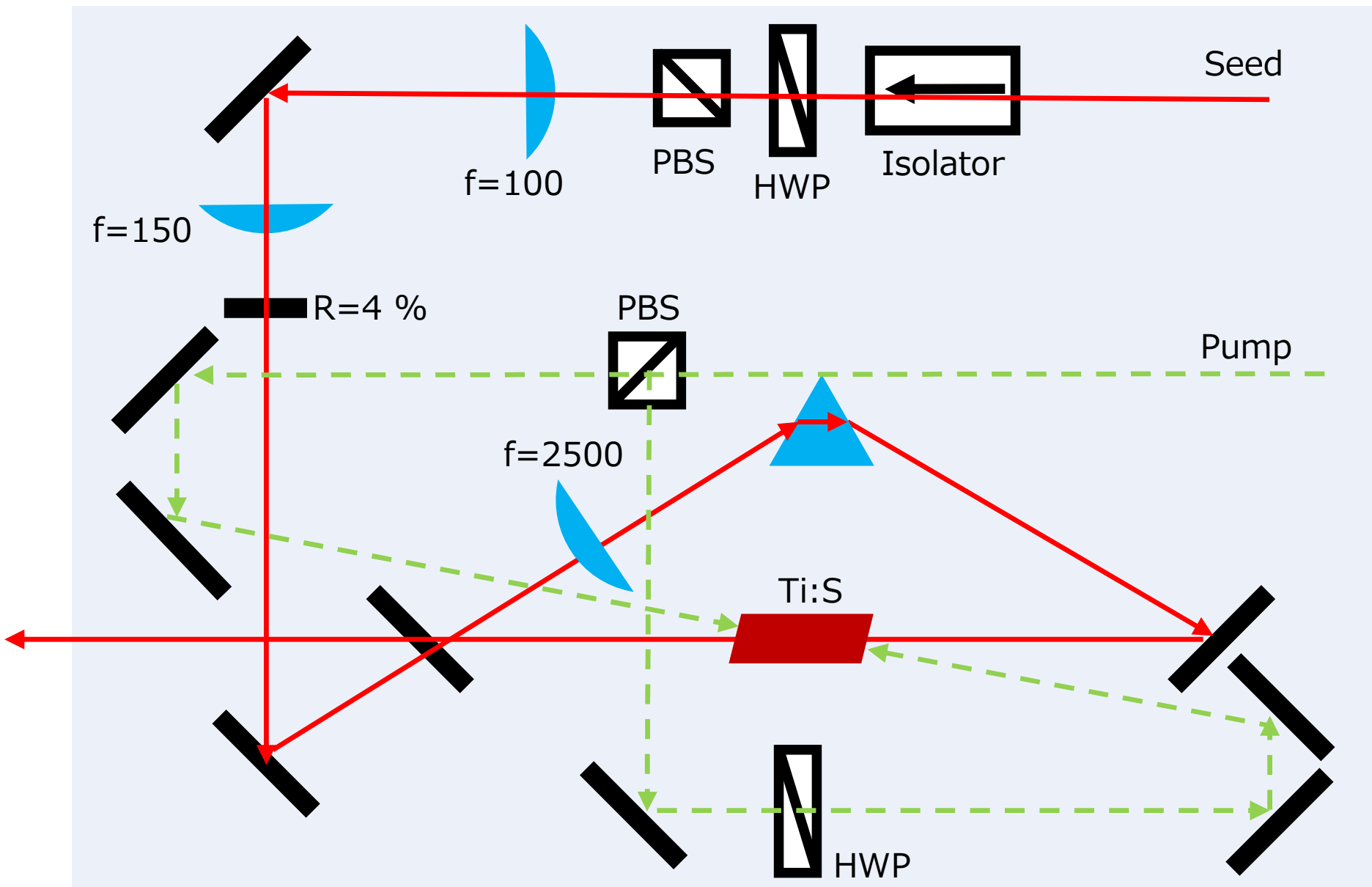


- 2種類開発
  - 786 nm
  - 749 nm

## ■ チタンサファイア (Ti:S) 結晶

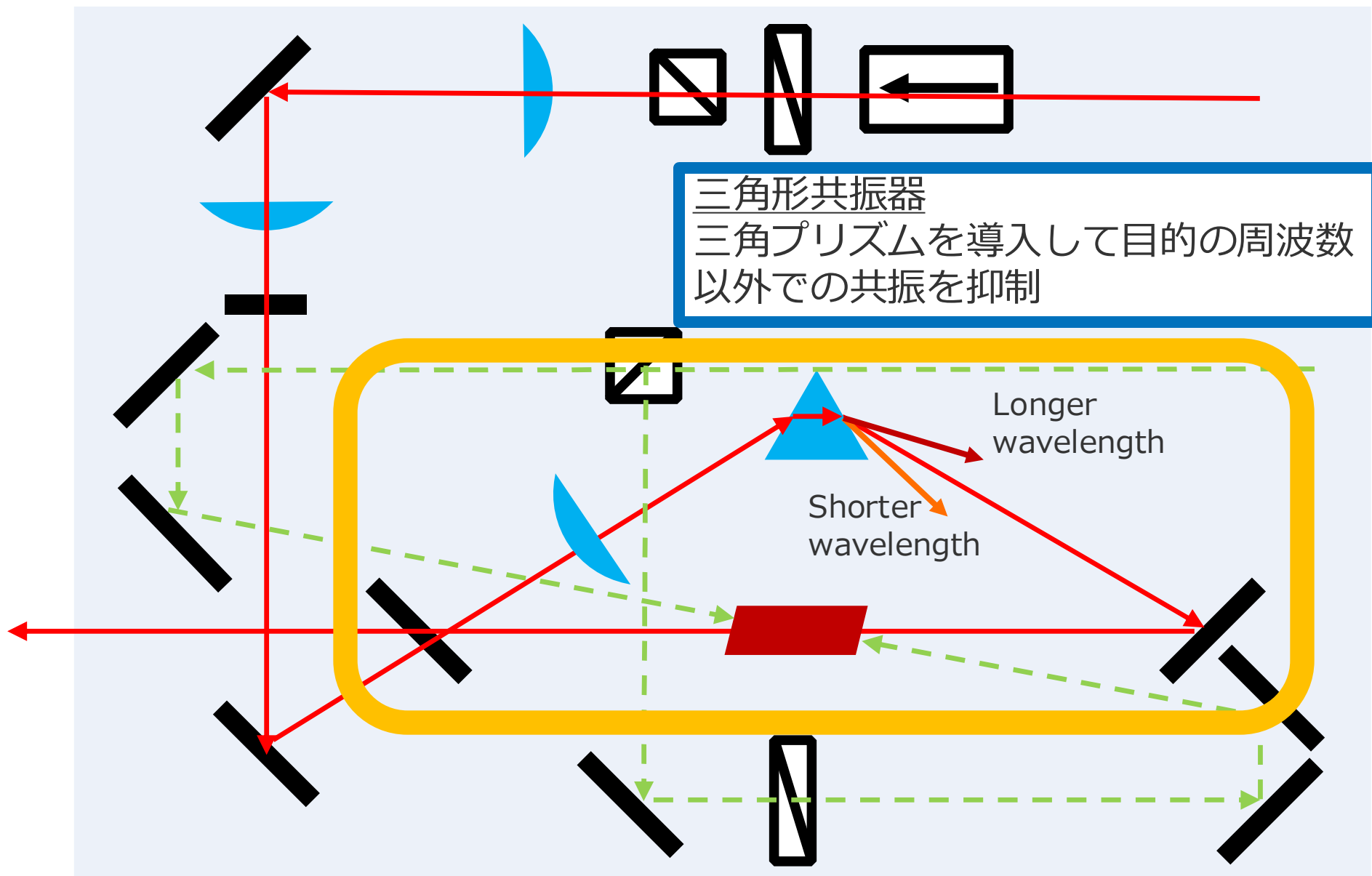


# オシレーター開発

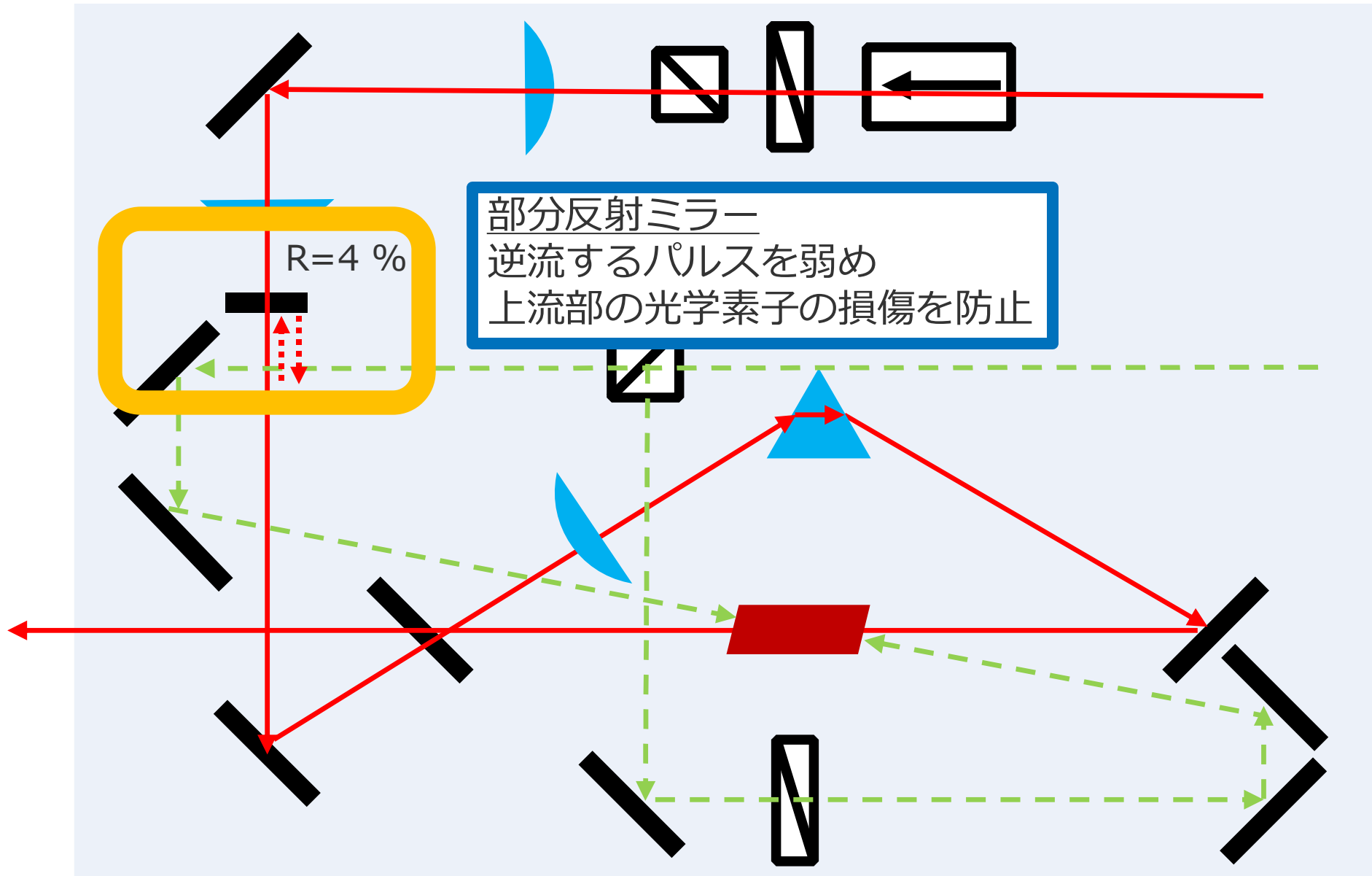




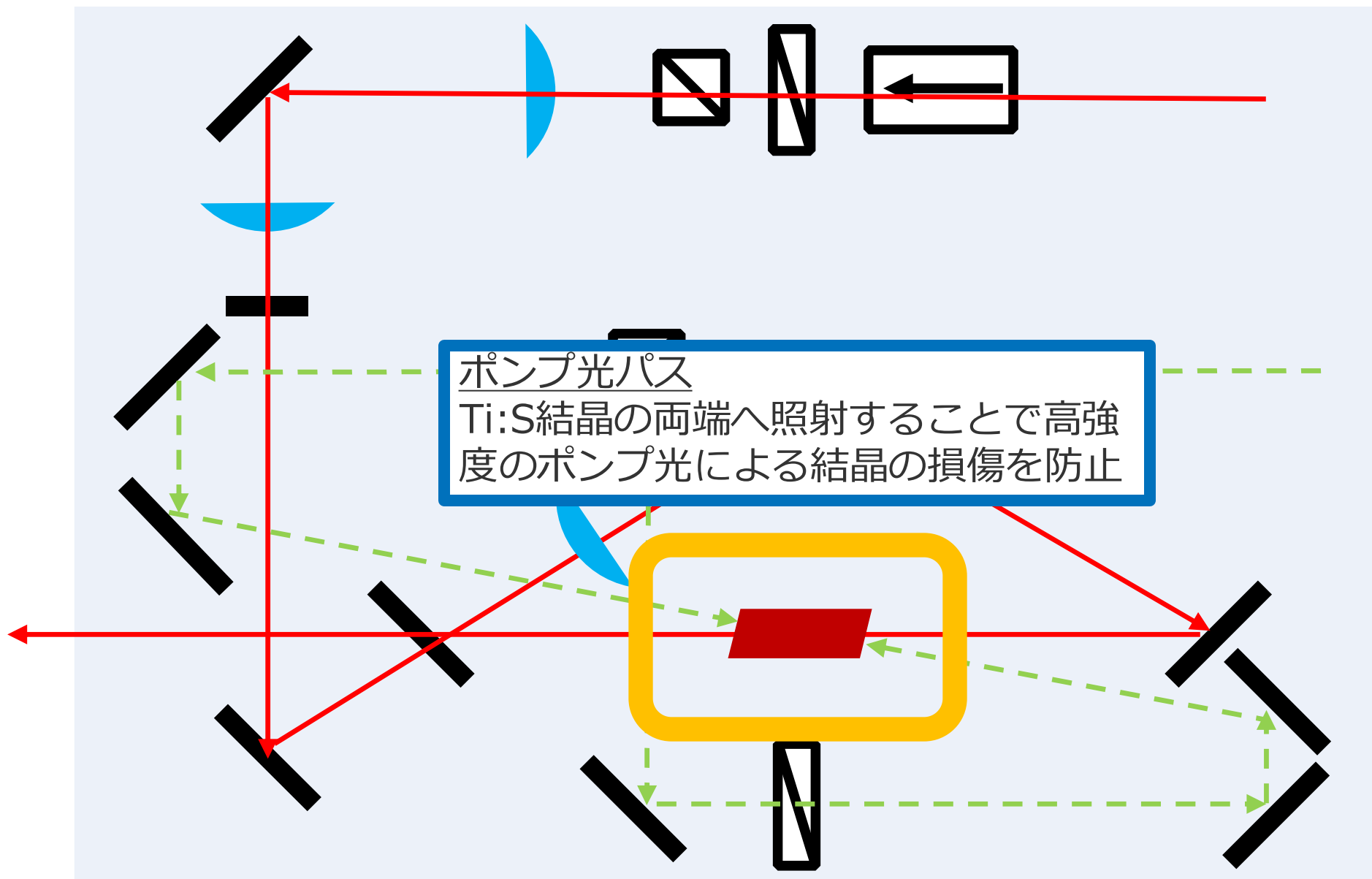
# オシレーター開発



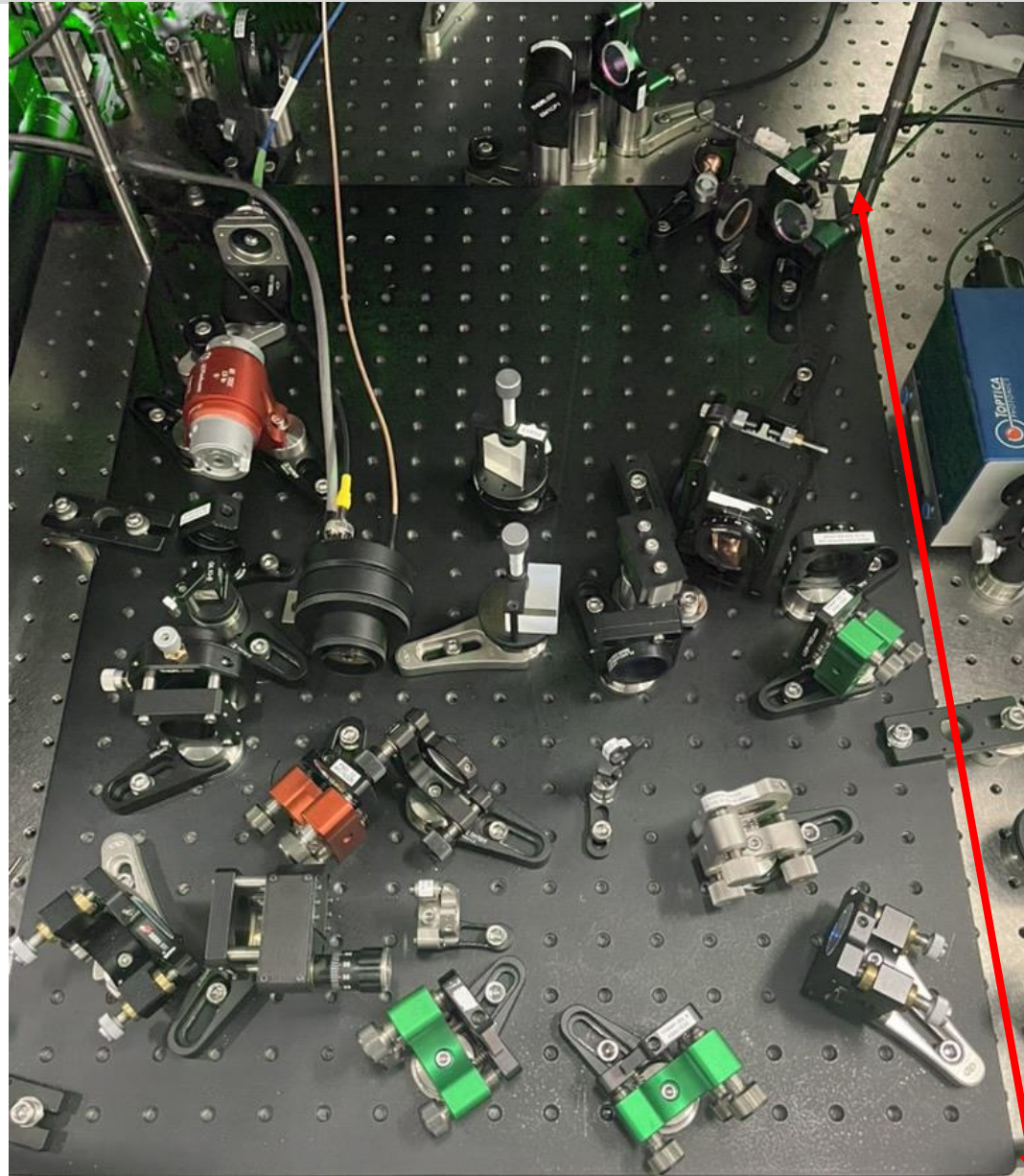
# オシレーター開発



# オシレーター開発



# オシレーター開発

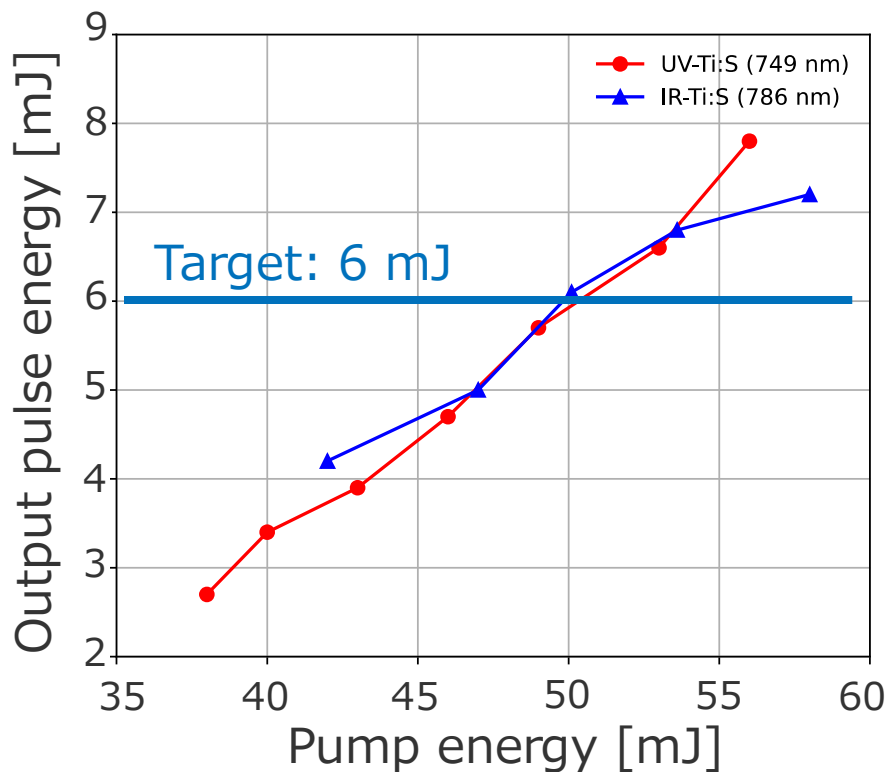
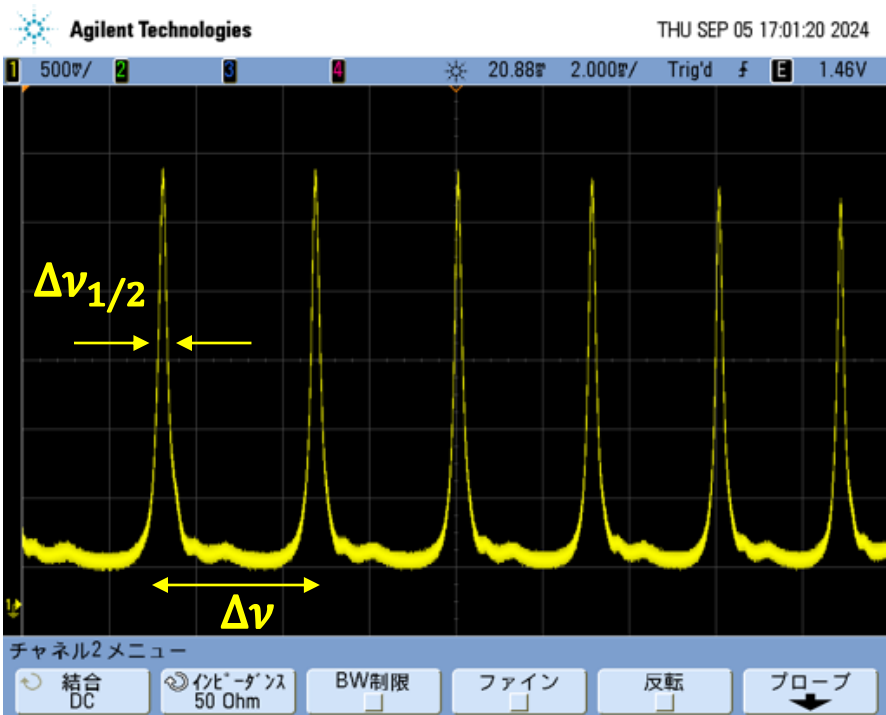


450 mm

600 mm

# オシレーター性能評価

- 共振器長をスイープしてフリンジを確認
- 出力パルスエネルギー(Seed: 5.5 mW)



- Finesse ~16: (反射率・透過率からの計算値と一致) → アライメント良好

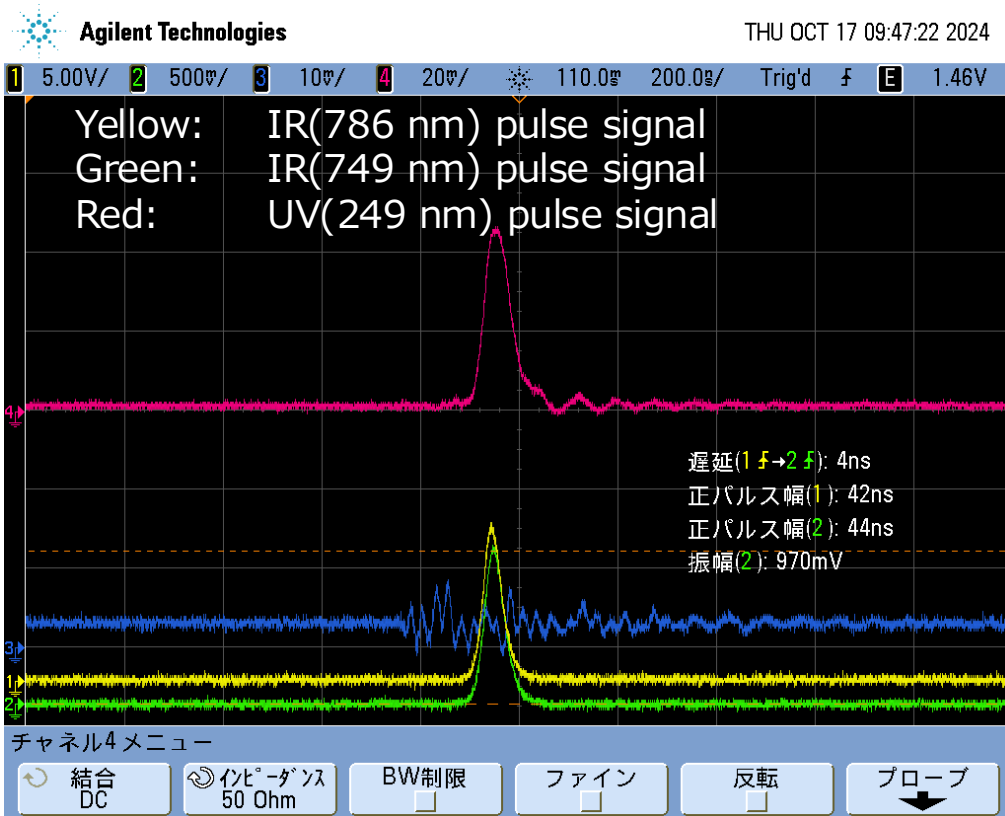
共振器の分解能

$$\text{Finesse} = \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}} = \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{1/2}} \quad R: \text{total reflectance of optics}$$

高出力IRオシレーターの開発が完了

# パルス性能評価

- タイムジッター: ~ 2.4 ns  
→パルス幅と比較して十分小さく安定



- 786 nm  
パルスエネルギー 6 mJ  
パルス幅 40 ns  
 $M^2$  1.10  
線幅 18 MHz
- 749 nm  
パルスエネルギー 6 mJ  
パルス幅 30 ns  
 $M^2$  1.11  
線幅 15 MHz
- 249 nm  
パルスエネルギー 2 mJ

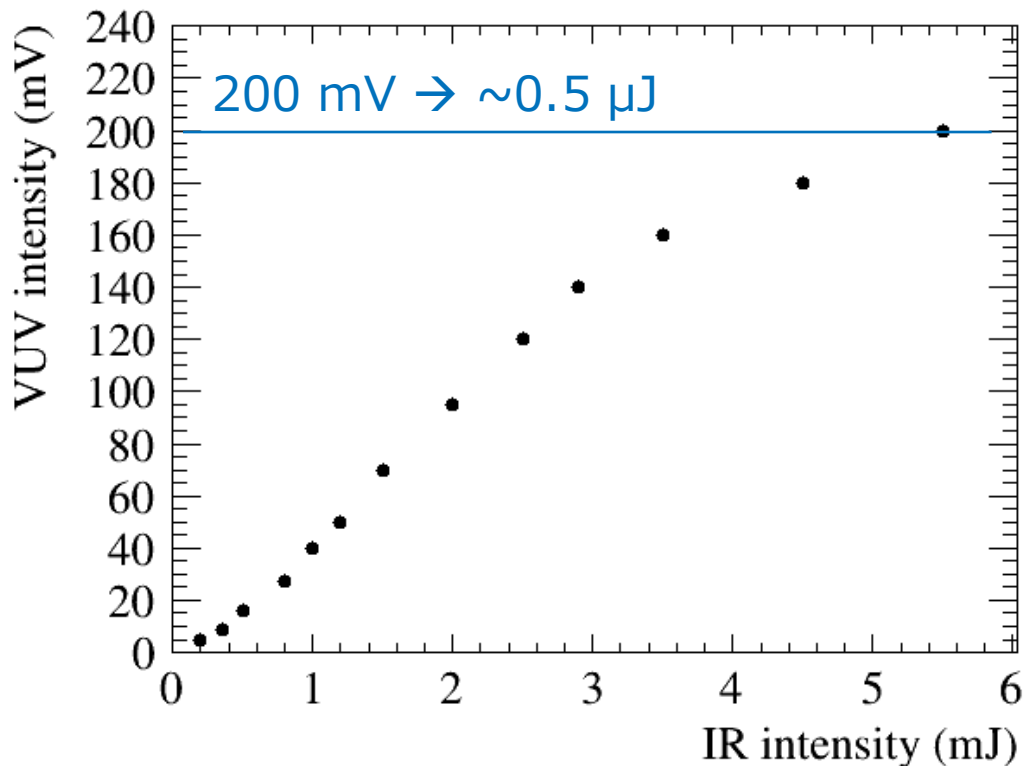
\* $M^2$ : Difference from an ideal single-mode laser (Closer to 1 is better)

VUVパルス生成に必要なIR・UVパルスの開発が完了

# VUVパルスエネルギー

- VUVパルスエネルギーをPDで検出し、オシロスコープで確認

IR power dependence  
UV: 1.3 mJ



- PDの受講感度からオシロで確認した信号をエネルギーに換算
- VUVパルスエネルギー:  
10 mV(@oscilloscope) ~ 25 nJ
- IR 5.5 mJ, UV 1.3 mJ  
→ VUV 0.5 μJ

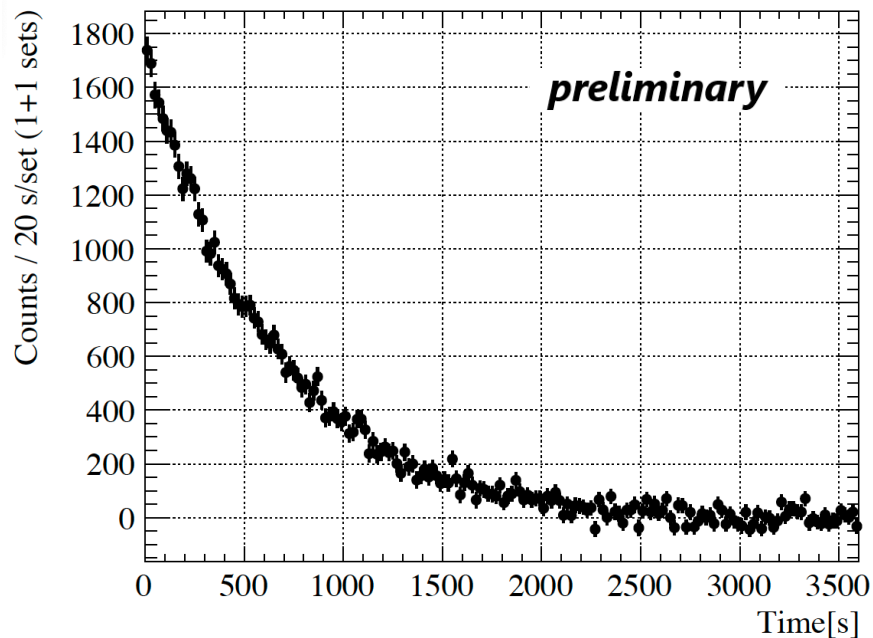
目標VUVパルスエネルギーを達成

# レーザー励起実験

- Th-229をドーブした CaF<sub>2</sub>にVUVパルスレーザーを照射し、脱励起光を観測
- レーザー60秒照射、検出時間3600秒で1セット測定

## □ 本研究による脱励起光観測結果

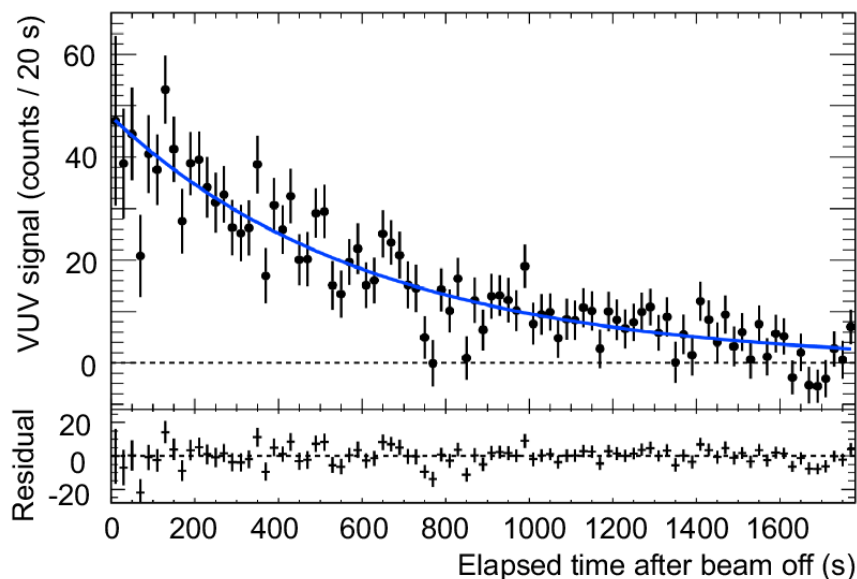
h\_signal\_diff



脱励起光が時定数~600秒で減衰していく様子を  
観測→レーザー励起成功

## □ これまでの脱励起光観測結果

@SPring-8



T. Hiraki *et al.*, Nature Communications **15**, 5536 (2024).

$T_{1/2} = 447 \pm 16(\text{stat.}) \pm 27(\text{syst.}) \text{ s}$

アイソマーは放射光X線を用いて生成

- イールドは過去の測定結果と比較して桁違いに大きい

従来よりも大量のアイソマーの生成に成功



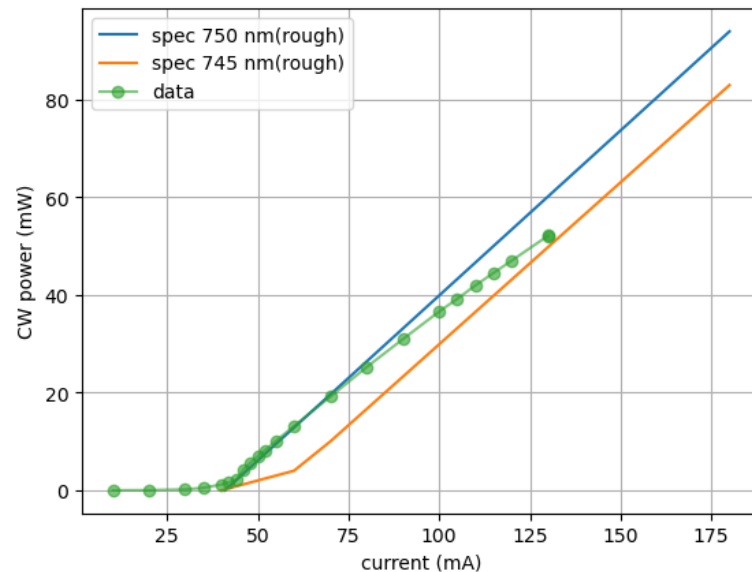
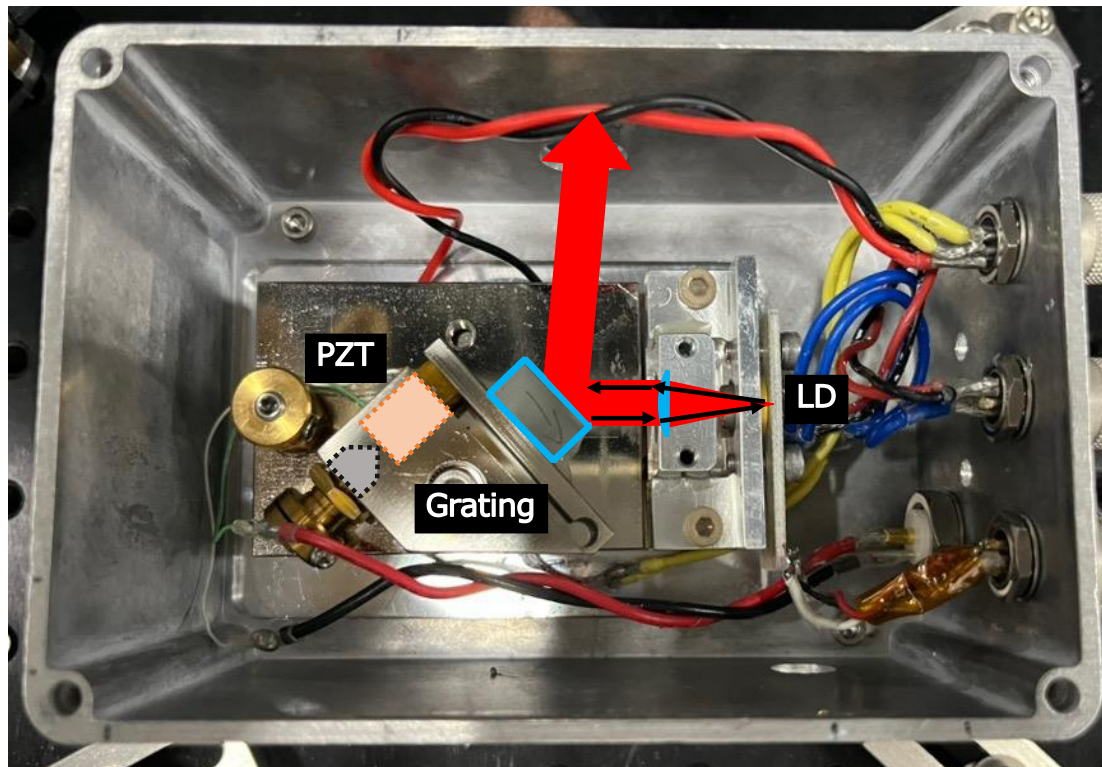
# まとめ

- オシレーターを用いたIR-UVレーザーシステムを開発し、四光波混合に必要な性能を持つレーザーの生成に成功した
- 四光波混合を通じて、約 1  $\mu\text{J}$  のパルスエネルギーを持つ VUV パルスレーザーの開発に成功した
- Th-229 ターゲットへの照射および直接励起実験を行い、脱励起光の観測に成功した
- VUVレーザー線幅は今後の分光実験で得られるスペクトルにより評価する予定である
- 結晶場分裂のスペクトルを取得・解析するために分光測定を実施予定である

BACK UP

# Development of Seed Light for 749 nm

- External Cavity Diode Laser (ECDL)
- Wavelength tuning:  $\pm 0.08$  nm
- Converted to UV range (third-harmonic)  $\pm 0.24$  nm  $\rightarrow$  Optimized for VUV intensity



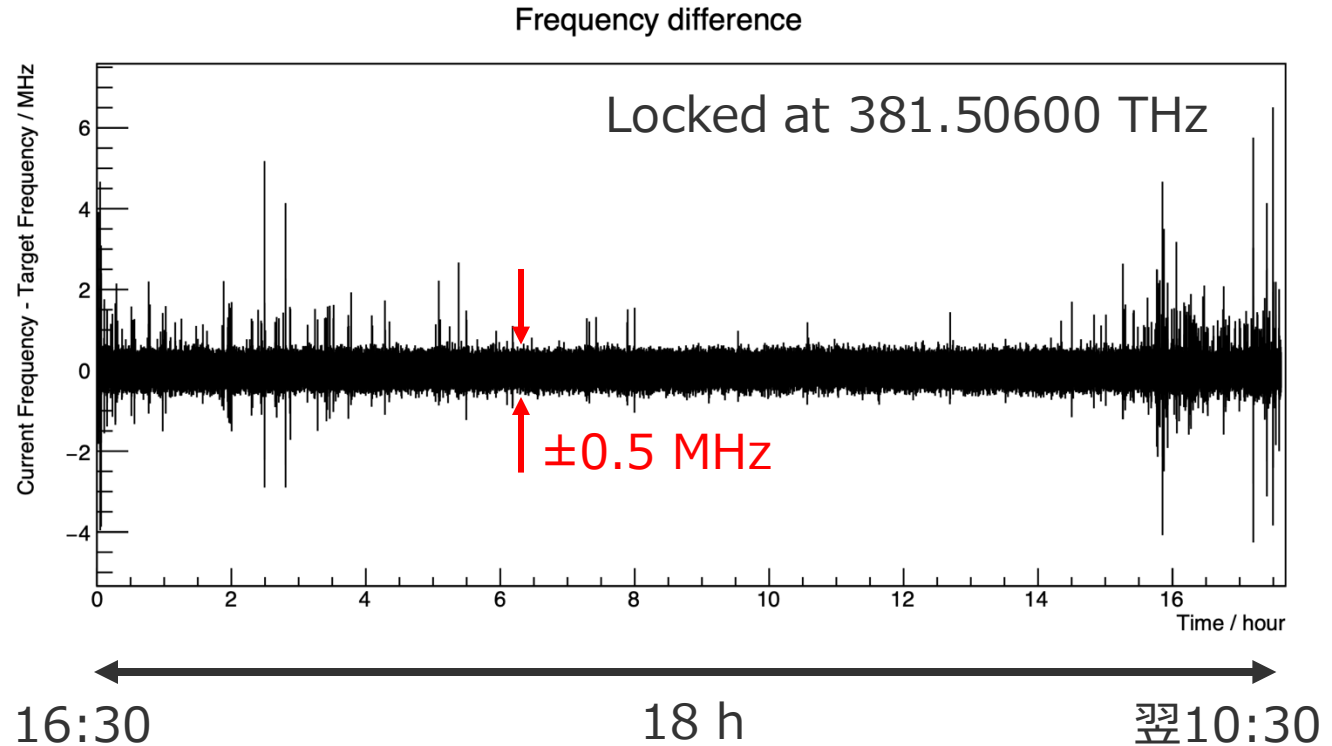
- Comparison of output with LD catalog values
- Consistent in both oscillation threshold and power

Development of a 749 nm ECDL with Frequency Tunability within the Target Range

# Frequency Stabilization of Seed Light

## ■ Frequency Locking System

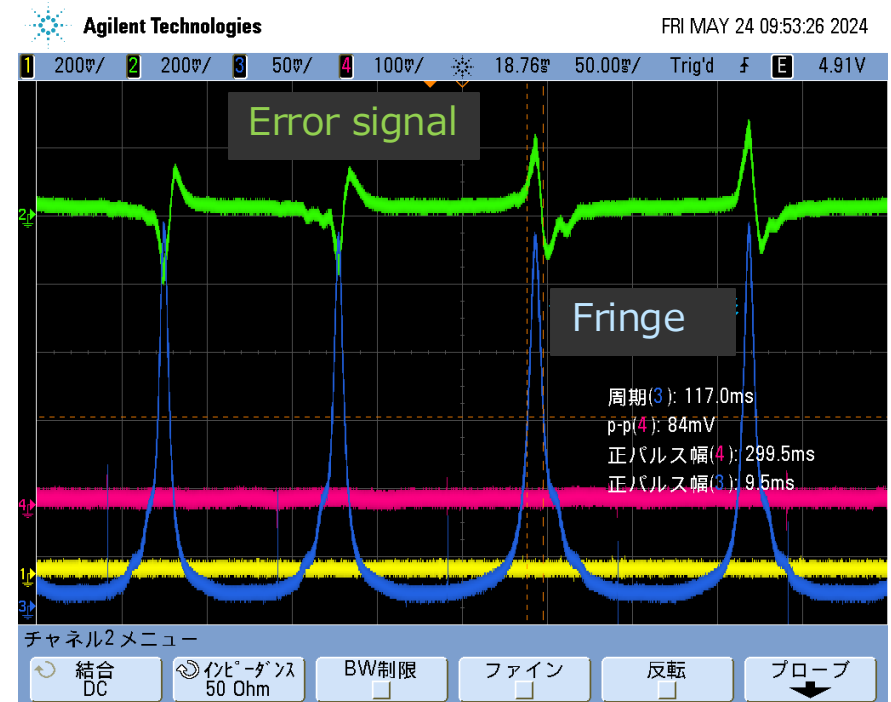
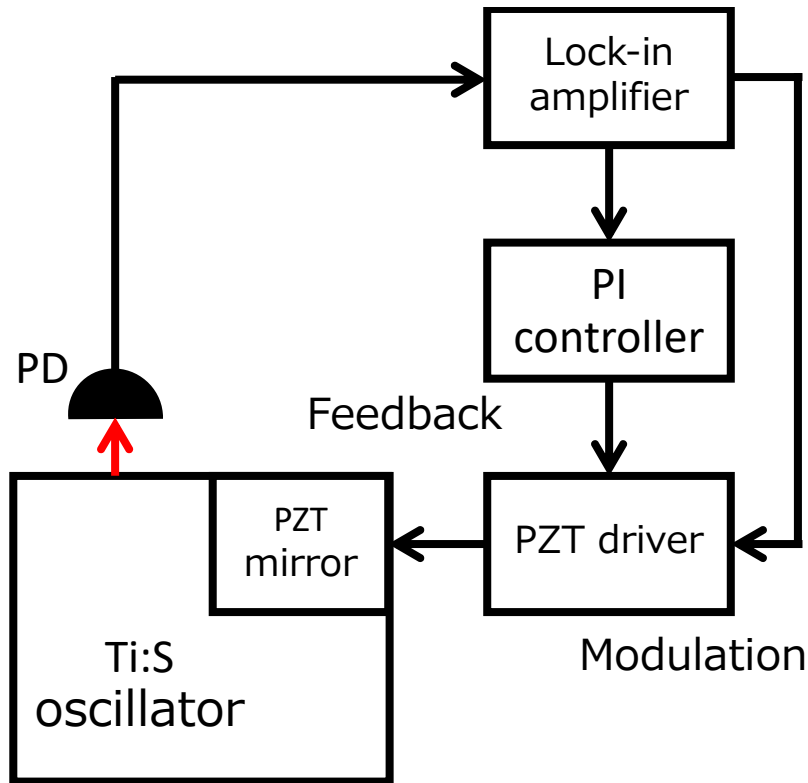
Developed a control system to stabilize seed light at a set frequency



Stabilized with an accuracy of  $\pm 0.5$  MHz

# Stabilization of Cavity

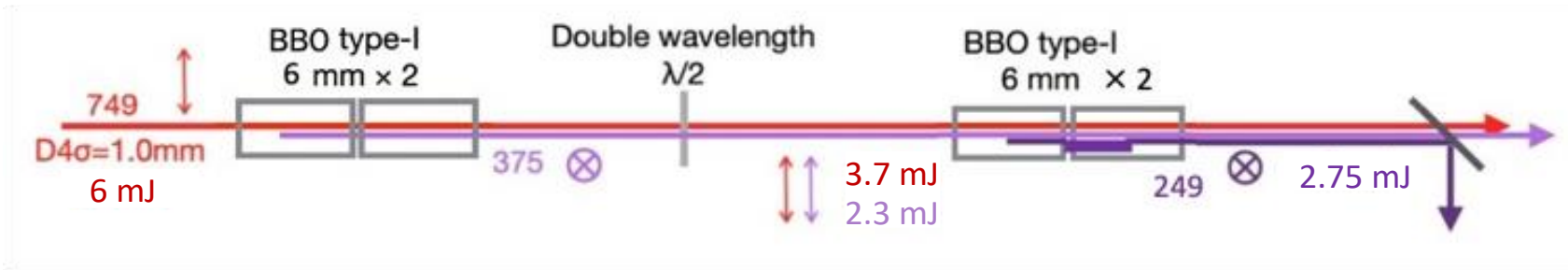
- Stabilize the output by adjusting the cavity length



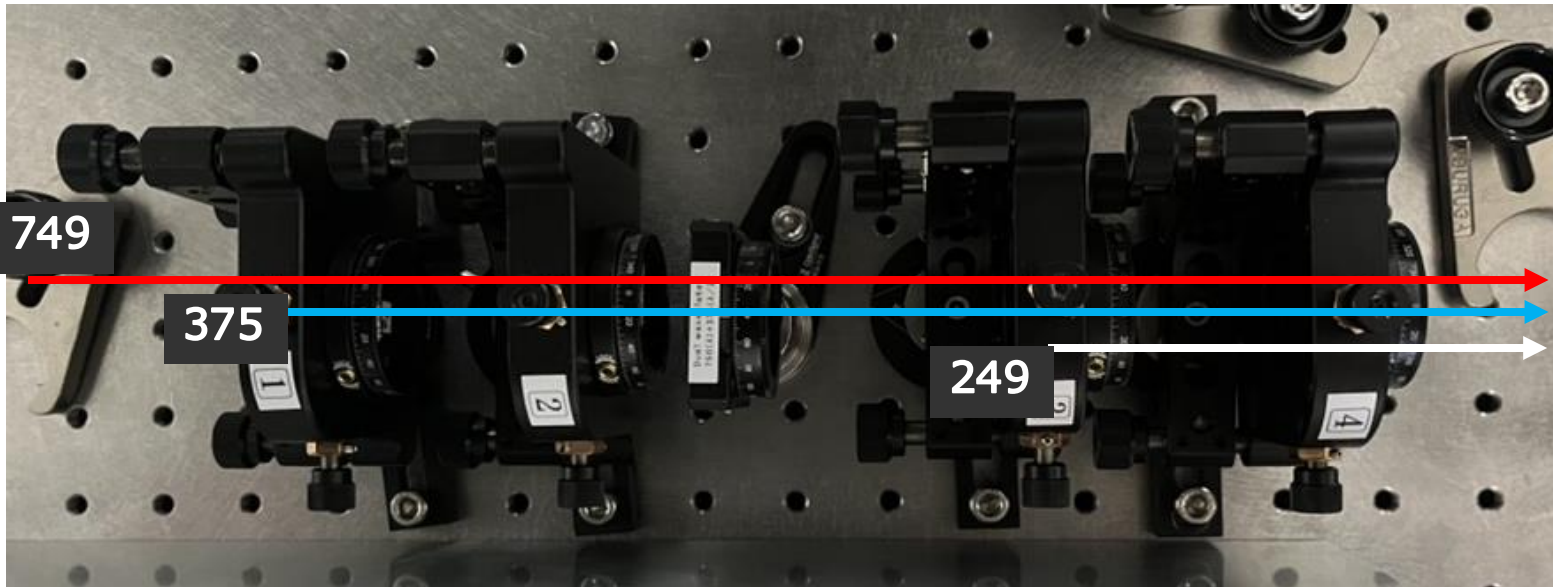
- Differentiated Signal of the Fringe Waveform
  - The sign is reversed on either side of the fringe peak
- Using PI control, the PZT voltage is adjusted to the peak position, stabilizing the resonator

# UV Pulse Generation

- Third-harmonic generation (THG) from 749 nm to 249 nm
- UV pulse energy simulation



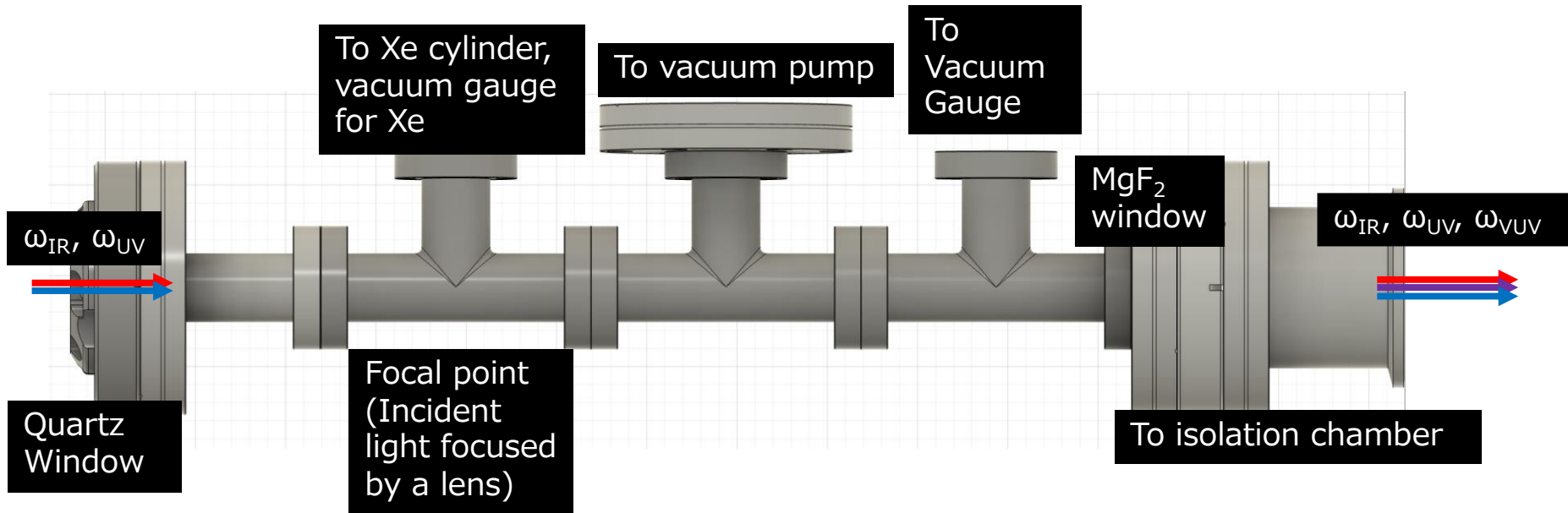
- System construction with four BBO crystals



UV pulse energy:  $\sim 2$  mJ  $\rightarrow$  consistent with simulation

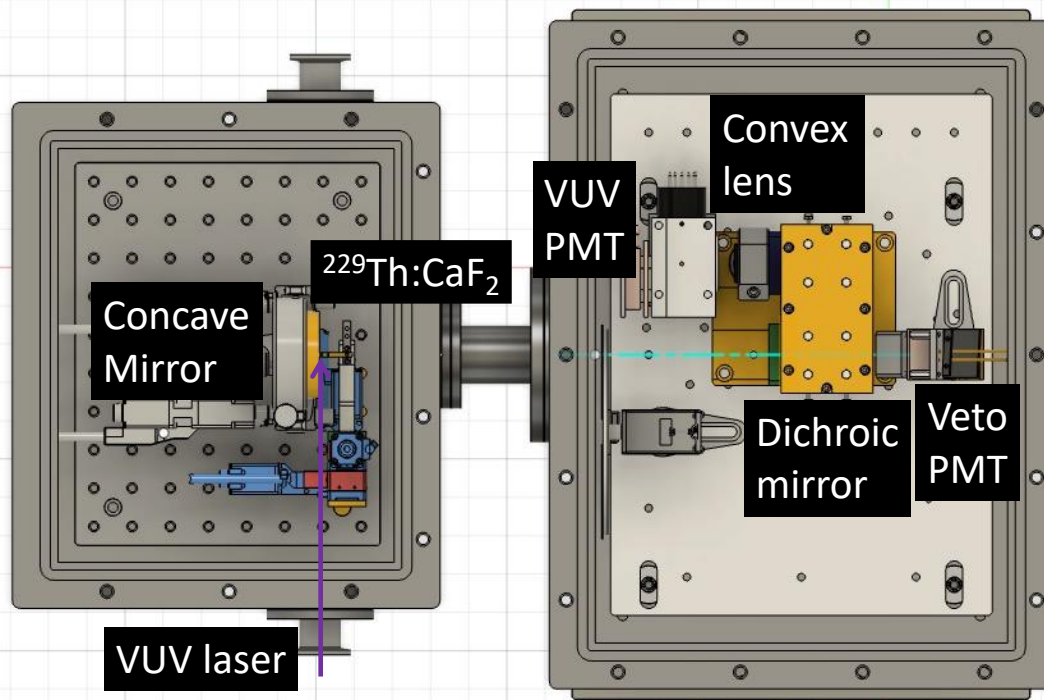
# VUV Generation System

- Xe Chamber for four-wave mixing
  - IR and UV pulses co-axially overlapped and injected
  - VUV pulses generated co-axially with IR and UV pulses
  - Xe pressure controlled between 100–2000 Pa
  - Recent Xe pressure: 100 Pa



Optimize VUV Output by Controlling Xe Pressure

# Detector



The detector used is the same as in Okayama University's spectroscopic experiments offering a high background event rejection rate (e.g., scintillation light from the crystal)

## ■ Target

Th-229 density:  $\sim 4 \times 10^{18} / \text{cm}^3$

Produced by TU Wien

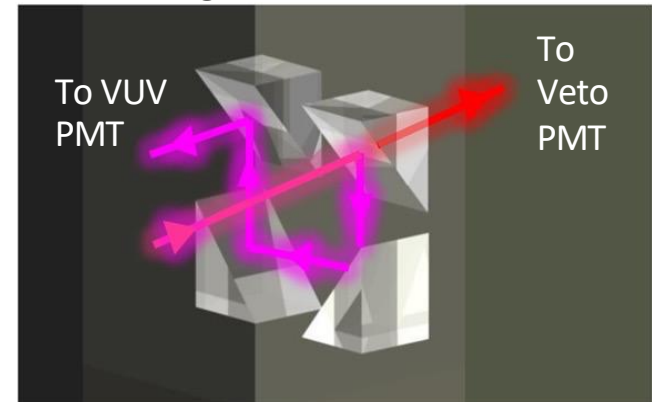


TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN



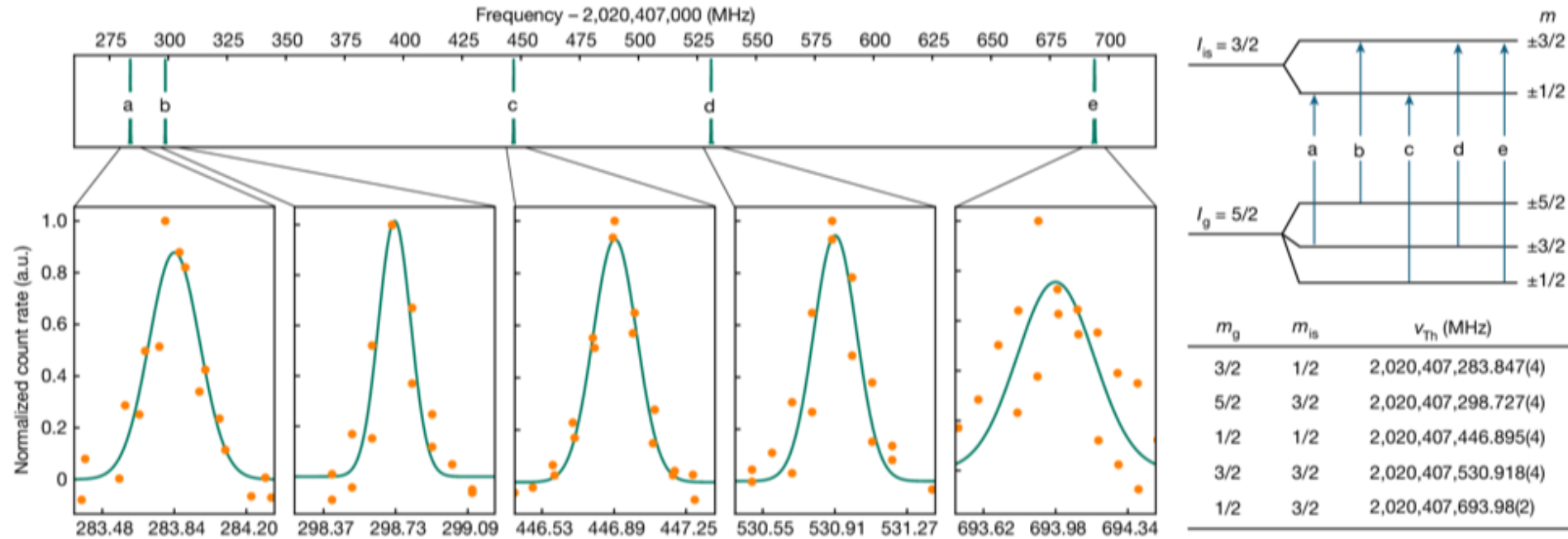
$\sim 1 \times 1 \times 1 \text{ mm}$

- Wavelength selection using a dichroic mirror





# Crystal field splitting



C. Zhang *et al.*, Nature **633**, 63 (2024).