

Th-229原子核時計実現に向けた真空紫外レーザー開発への挑戦

岡山大学 異分野基礎科学研究所
M1 清水航太郎

OUTLINE

1. 研究動機

1. ^{229}Th
2. 期待される応用例
3. 微細構造定数の時間依存性の検証
4. これまでの報告
5. アイソマー状態からの脱励起
真空紫外 (VUV) 光の検出方法
6. VUV光検出セットアップ
7. アイソマー発光観測

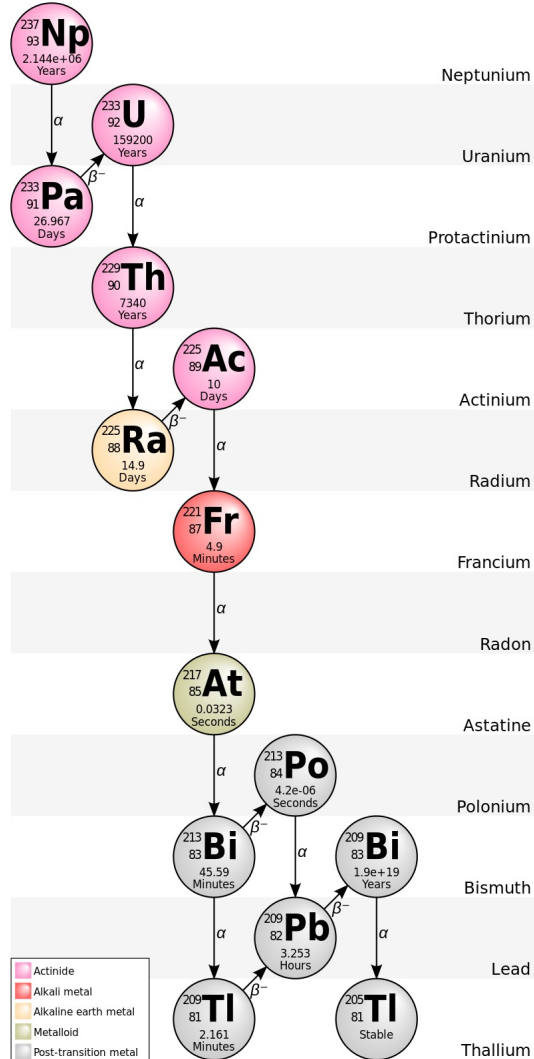
8. ^{229}Th レーザー励起

2. VUVパルスレーザー開発

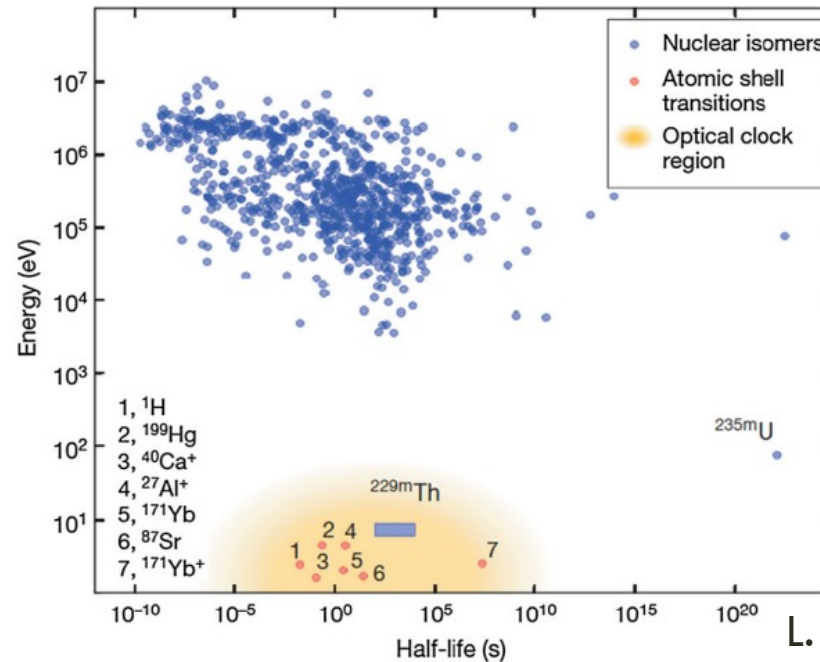
1. 要求されるレーザーパワー
2. VUV光生成の原理
3. VUVレーザー案
4. Ti:S共振器
5. 共振器評価
6. パルスエネルギー評価

3. まとめ

1-1. ^{229}Th



- $T_{1/2} \sim 7880$ [year]
- 全原子核の中で唯一レーザーによる直接励起が望める低エネルギーの第一励起準位をもつ
→アイソマー(準安定状態)、 ~ 8 [eV]、 $\tau \sim 10^3$ [s]



「原子核を用いた量子エレクトロニクス」の実現が期待されている

L. Wense et al., Nature **533**, 47-51 (2016).

1-2. 期待される応用例

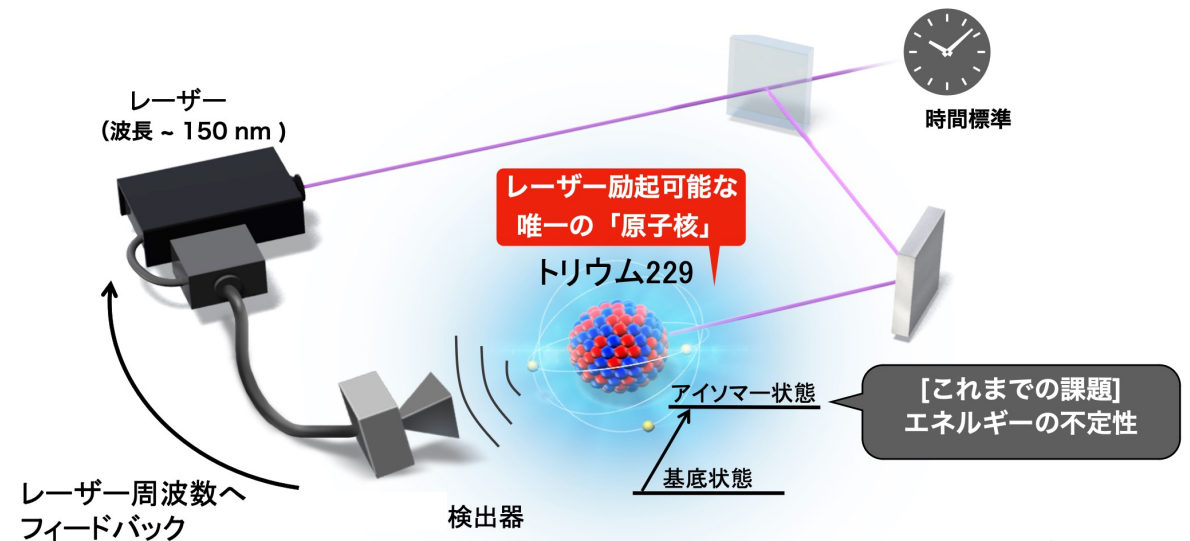
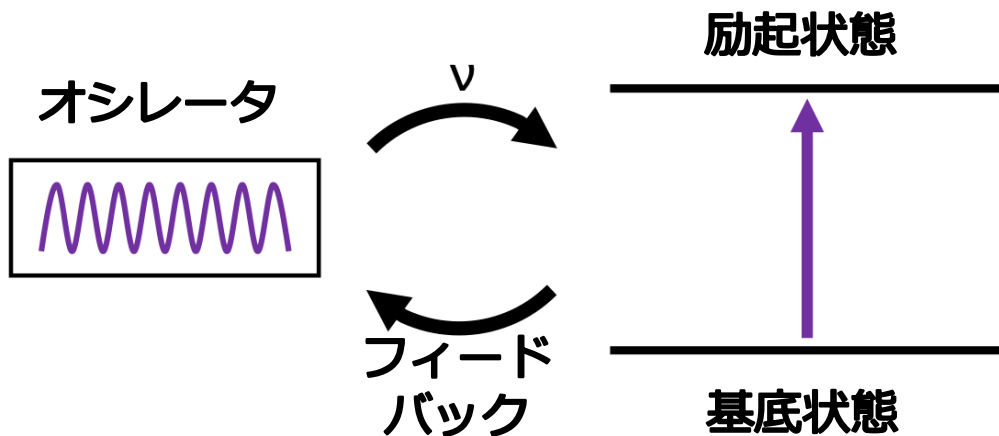
✓ 『1秒』の定義は？

^{133}Cs 原子時計

「セシウム133原子の基底状態の2つの超微細準位間の遷移に対応する放射の周期の9,192,631,770倍の継続時間
精度 $\sim 10^{-15}$

Sr光格子時計 精度 $\sim 10^{-18}$

原子核時計(精度 $\sim 10^{-19}$)の方式
・イオントラップ (高精度な周波数標準の作成が可能)
・イオン結晶を用いた固体型の時計標的 (一度に大量のThを励起可能)



1-3. 微細構造定数の時間依存性の検証

高エネルギー物理学→精密測定の精度の高さがカギ

原子核時計の精度： $\sim 10^{-19}$
実験精度をより高めることが可能

例：微細構造定数

$$\alpha = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 hc} \approx 1/137$$

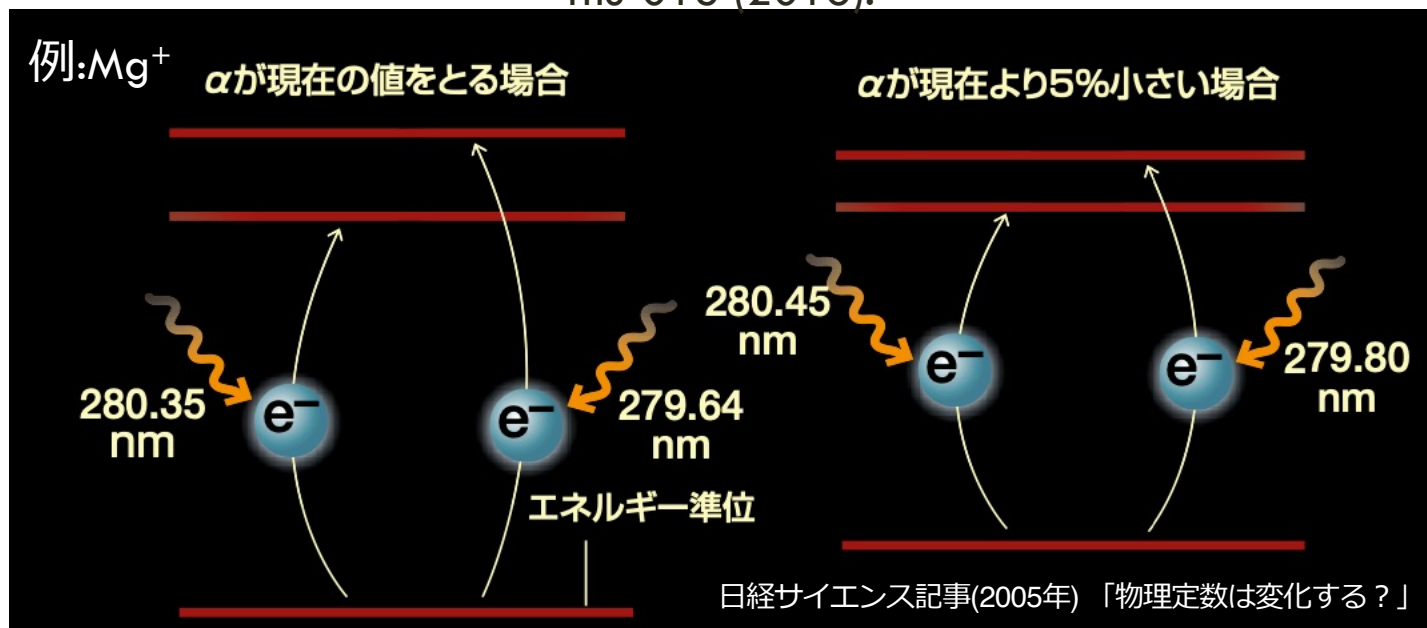
- 初期の宇宙では値が異なっていた可能性
→実は時間依存している？

$$^{171}\text{Yb}^+\text{S-F} + ^{87}\text{Sr}^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_0 \quad /$$

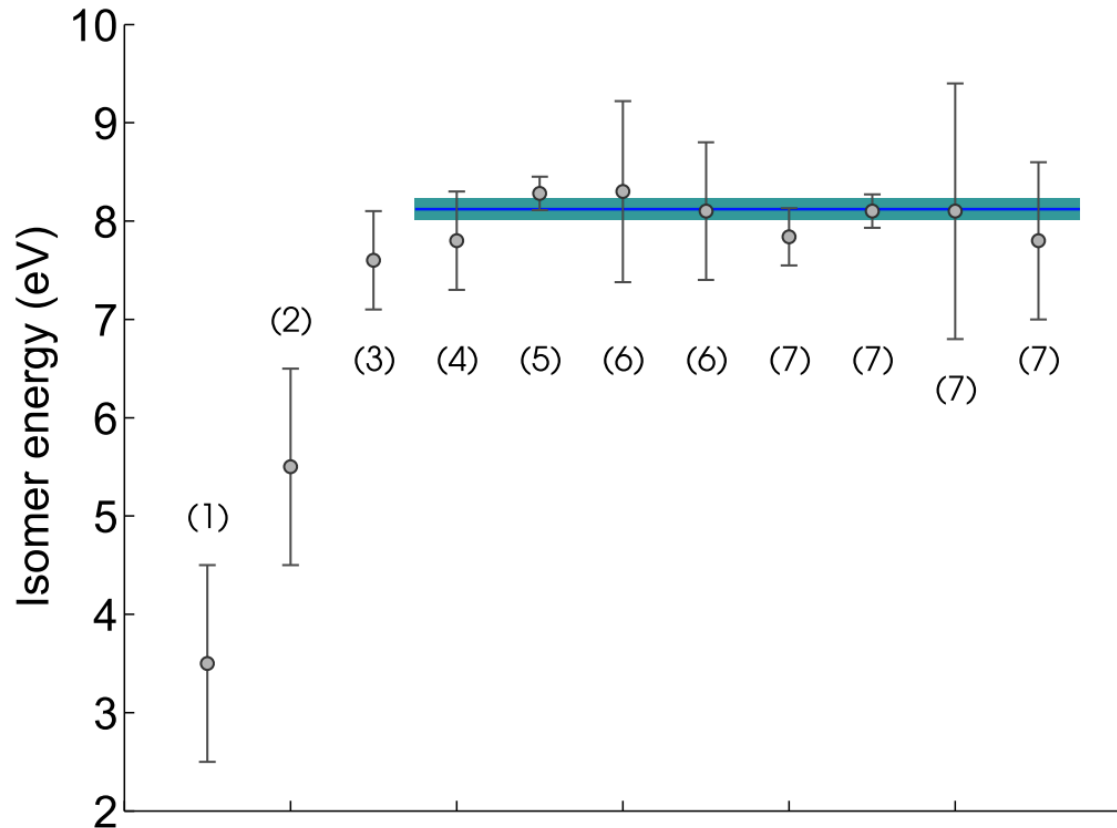
$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha\Delta t} = (-6.5 \pm 4.7) \times 10^{-18} \text{ [year]}$$

E. Peik, et. al., The 25th Int. Conf. on Atom. Phys. Thu-013 (2016).

- その他応用
「1秒」の定義の更新
相対論的測地学
ダークマター、ダークエネルギーの検証など...



1-4. これまでの報告

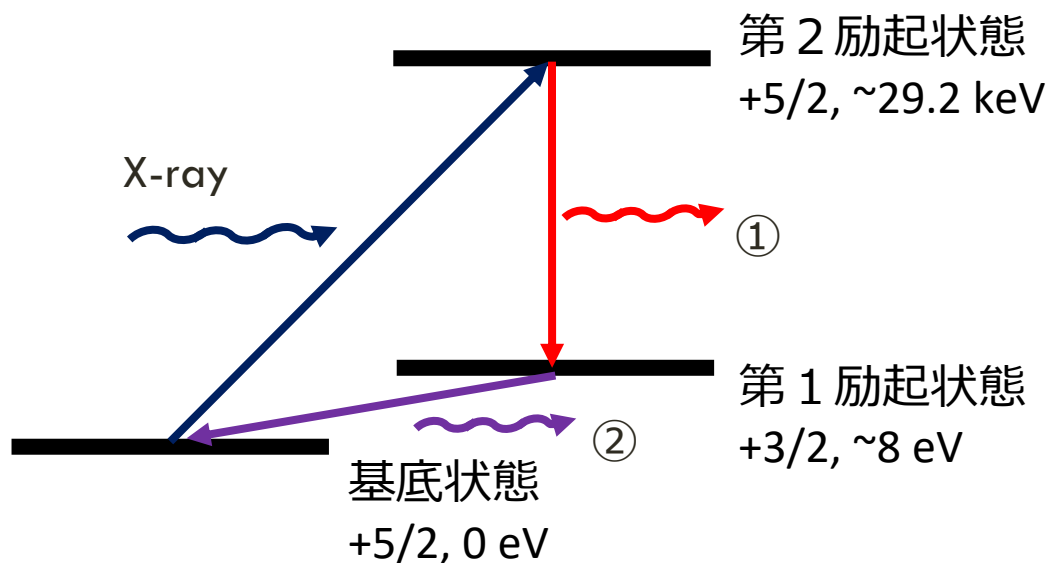


	Isomer energy (eV)
(1)	3.5 ± 1
(2)	5.5 ± 1
(3)	7.6 ± 0.5
(4)	7.8 ± 0.5
(5)	8.28 ± 0.17
(6)	8.30 ± 0.92 8.1 ± 0.7
(7)	7.84 ± 0.29 8.10 ± 0.17 8.1 ± 1.3 7.8 ± 0.8

いずれも脱励起光の直接観測によるものではない
→アイソマー励起・脱励起を直接観測したい

1. R. Helmer, C.W. Reich, An excited state of ^{229}Th at 3.5 eV. *Phys. Rev. C* 49, 1845–1858 (1994)
2. Z.O. Guimaraes-Filho, O. Helene, Energy of the $3/2^+$ state of ^{229}Th reexamined. *Phys. Rev. C* 71, 044303 (2005)
3. B.R. Beck et al., Energy splitting of the ground-state doublet in the nucleus ^{229}Th . *Phys. Rev. Lett.* 109, 142501 (2007)
4. B.R. Beck et al., Improved value for the energy splitting of the ground-state doublet in the nucleus ^{229}mTh , LLNL-PROC415170 (2009)
5. B. Seiferle et al., Energy of the ^{229}Th nuclear clock transition. *Nature* 573, 243–246 (2019)
6. A. Yamaguchi et al., Energy of the ^{229}Th nuclear clock isomer determined by absolute γ -ray energy difference. *Phys. Rev. Lett.* 123, 222501 (2019)
7. T. Sikorsky et al., Measurement of the ^{229}Th isomer energy with a magnetic micro-calorimeter. *Phys. Rev. Lett.* 125, 142503 (2020)

1-5. アイソマー状態からの脱励起真空紫外 (VUV) 光の検出方法



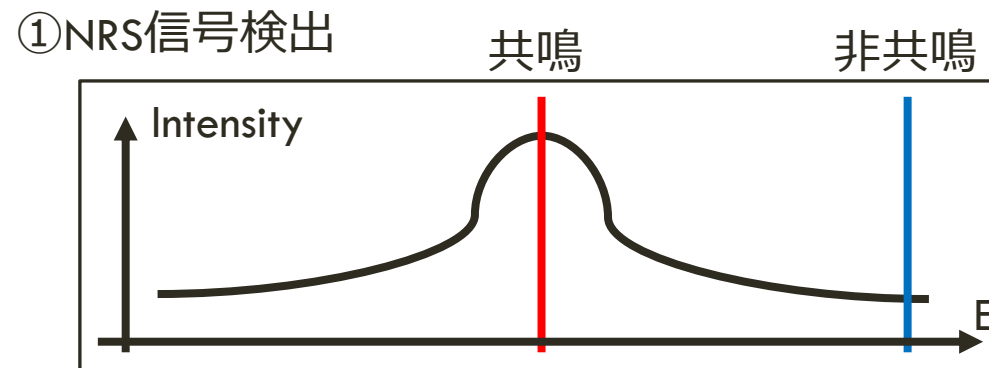
バックグラウンド
 ・Thの α 崩壊、 β 崩壊由来
 ・X線照射による蛍光
 標的

Made by TU Wien
 CaF₂ : VUV領域で透明

^{229}Th doped CaF₂



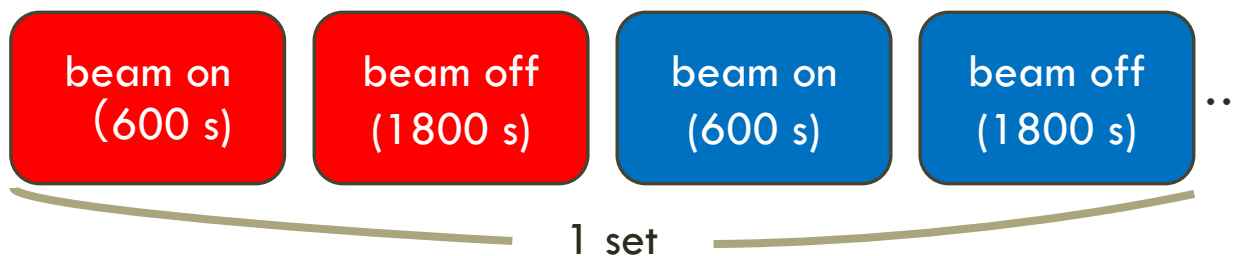
~1×1×1 mm



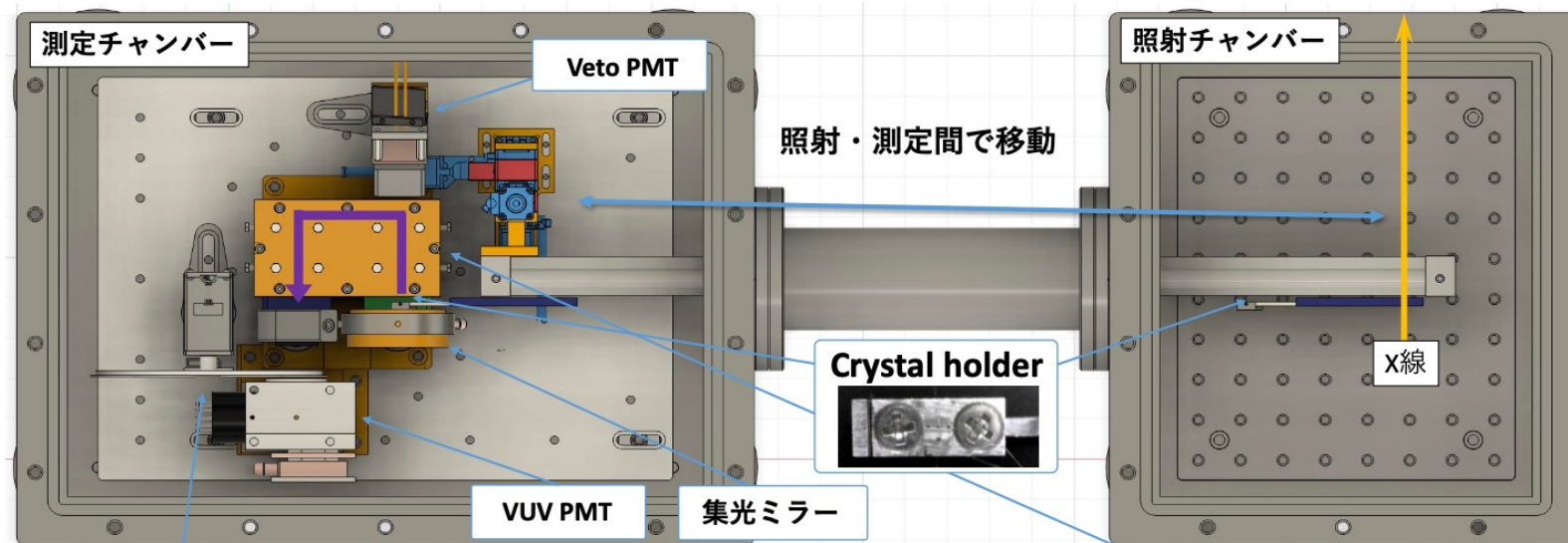
② VUV光検出 (共鳴照射後) - (非共鳴照射後)

共鳴エネルギー

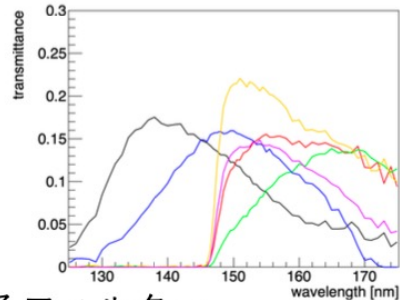
非共鳴エネルギー



1-6. VUV光検出セットアップ

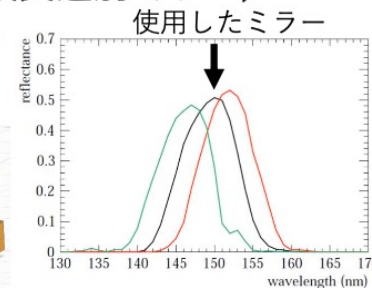
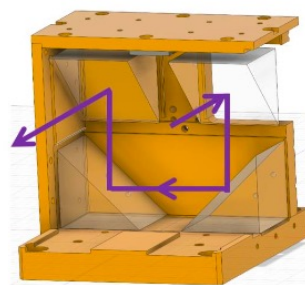


Band-pass filter



- 透過率の異なるフィルター
- VUV光の波長決定に使用

Dichroic mirror (波長選別ミラー)

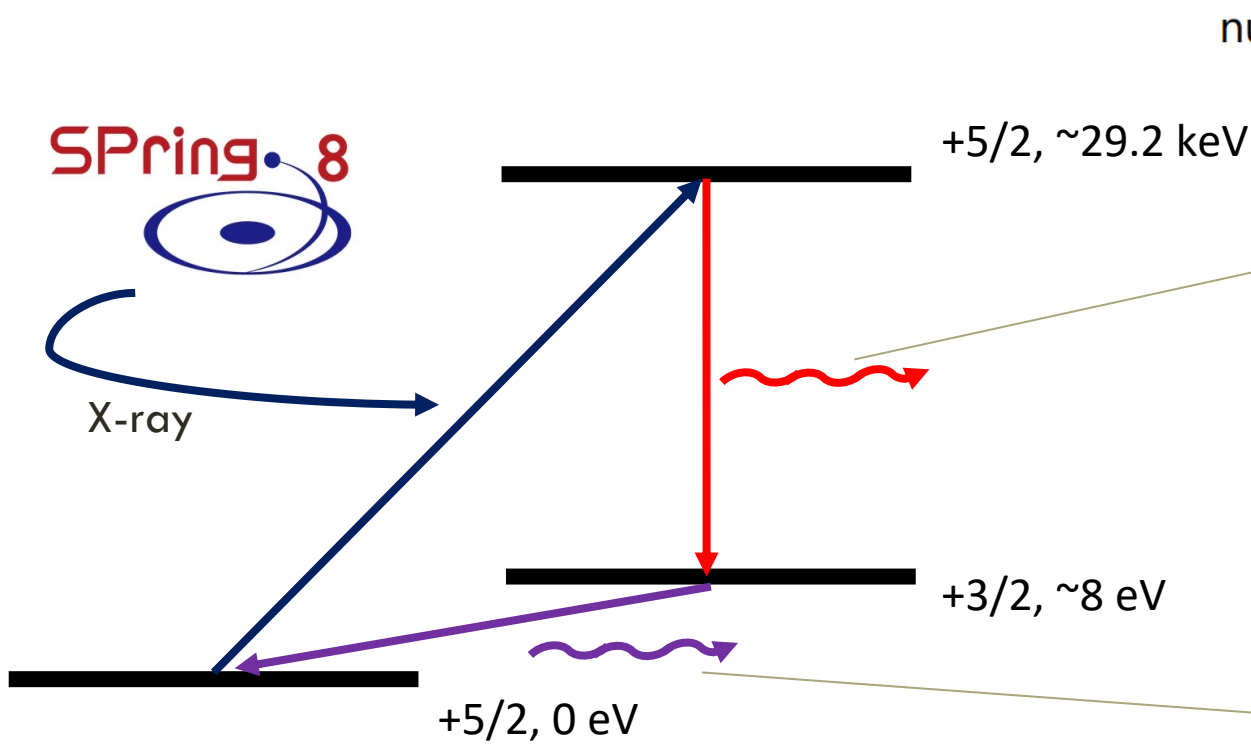


- VUV領域以外の光の除去

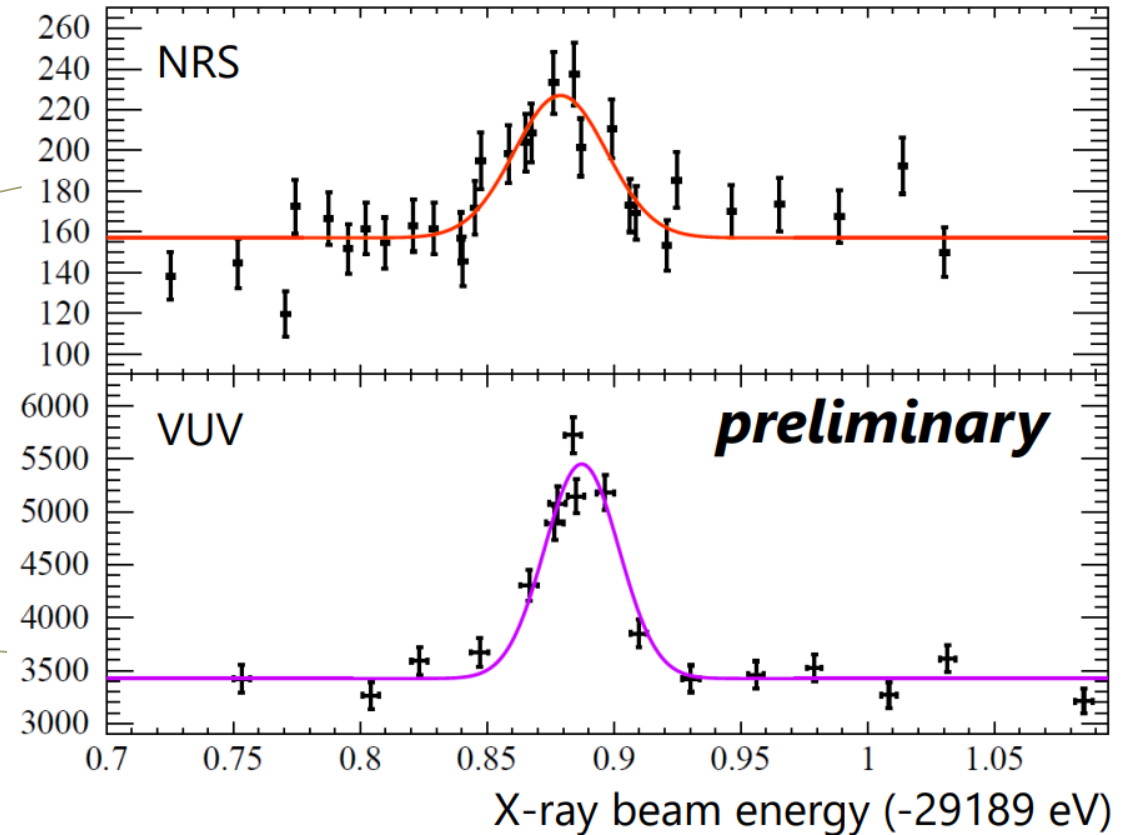
1-7. アイソマー発光観測

脱励起光の観測に成功

$\lambda = 148.18 \pm 0.38(\text{stat.}) \pm 0.19(\text{syst.}) [\text{nm}]$



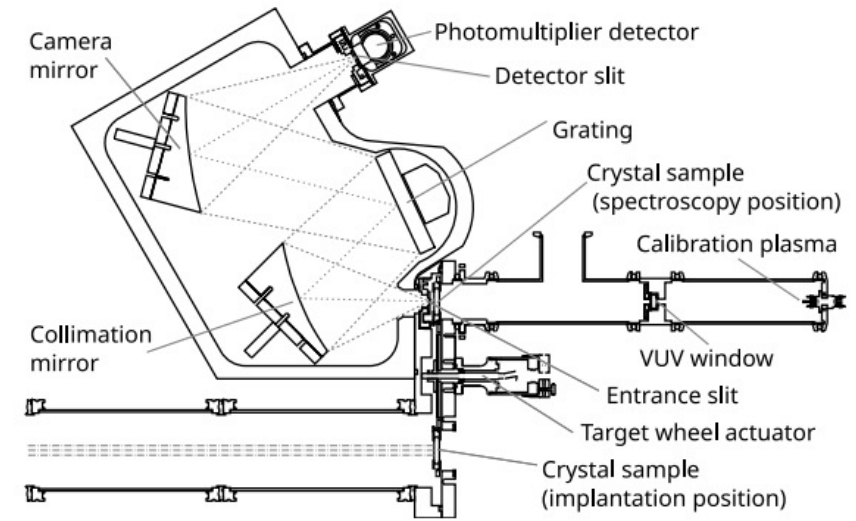
number of events



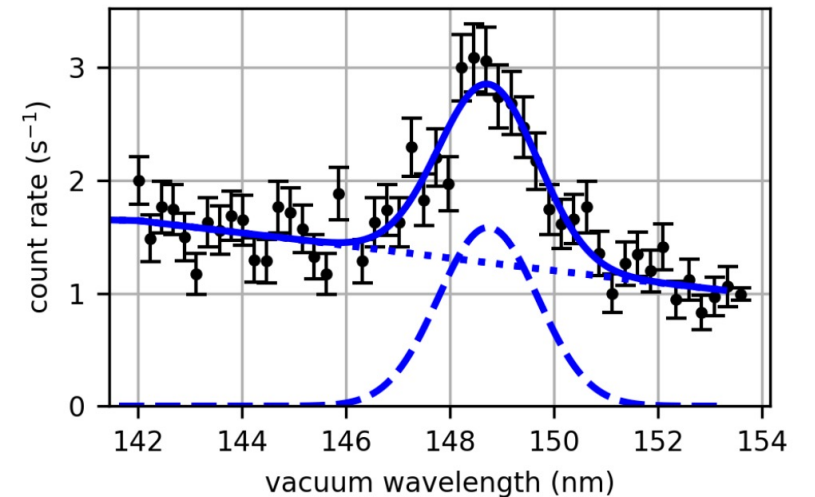
1-8. ^{229}Th レーザー励起

- アイソマーの光遷移を観測する
(脱励起に伴い放出されるVUV光の検出)
→成功 S. Kraemer *et al.*, Nature **617** 706 (2023).
岡大Thグループの手法については大懸ポスターにて

- 直接励起に必要なVUVレーザーの開発
4光波混合によるVUVレーザーの開発を目指す



分光セットアップ
結果



2-1. 要求されるレーザーパワー

パルスレーザー

$$\begin{aligned} \rightarrow 10 \mu\text{J}/10 \text{ GHz} &= 10 \mu\text{J}/8.3 \text{ eV} = 10 \mu\text{J}/(1.60218 \times 10^{-19})/10 \text{ GHz} \\ &= 7.5 \times 10^{12} \text{ photons/pulse} \end{aligned}$$

^{229}Th doped crystal中におけるアイソマー数

本来励起に使われる線幅: 10 mHz --> 7.5 photons/pulse

クリスタル中の原子核励起に使われる線幅: 1 kHz --> 7.5×10^5 photons/pulse

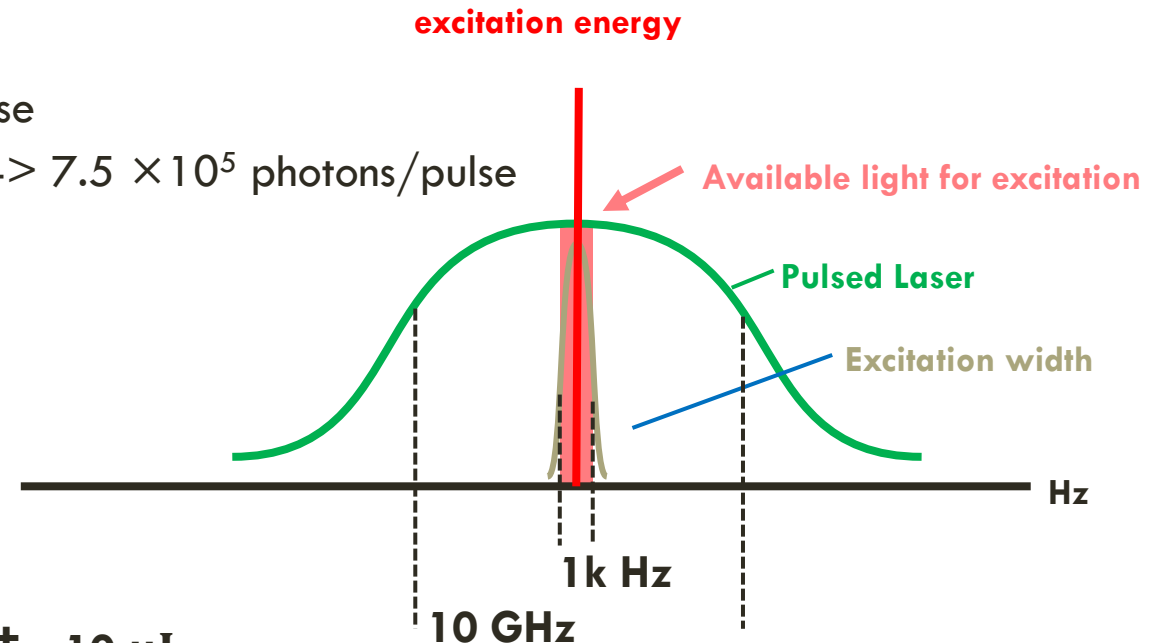
→ 予想されるアイソマー生成数 $\sim 7.5 \times 10^5$ /pulse

X-ray@SPring-8

→ SPring-8実験で生成できたアイソマー数:

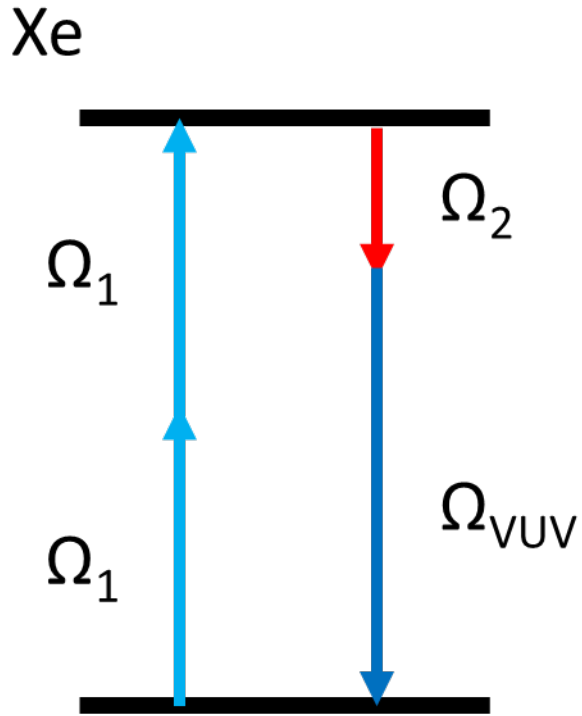
$\sim 1.6 \times 10^5$ /set

→ ^{229}Th アイソマーシグナルを得るために必要なパワーは $\sim 10 \mu\text{J}$

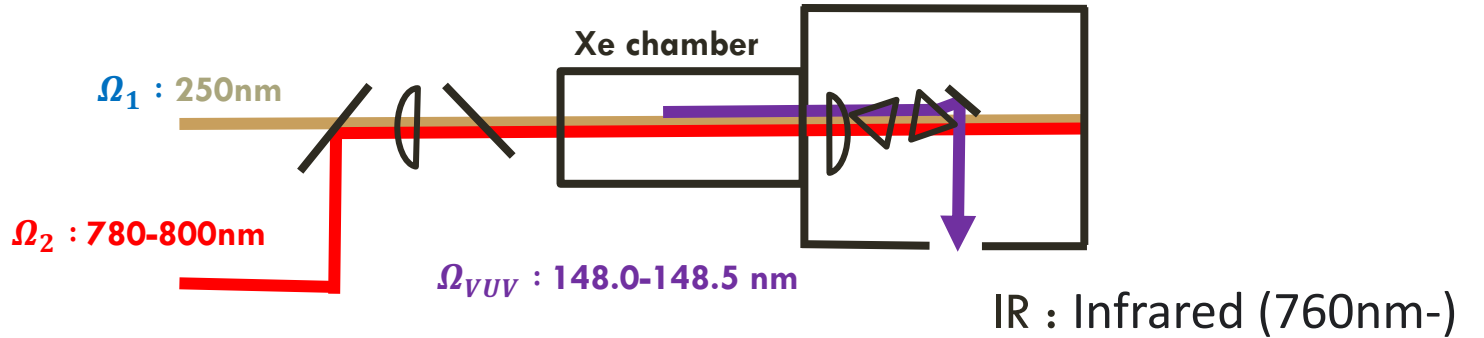


2-2. VUV光生成の原理

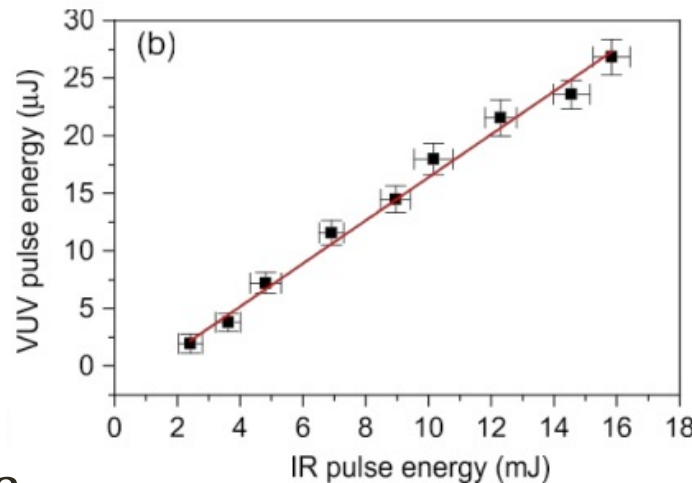
• Xeガスを用いた4光波混合



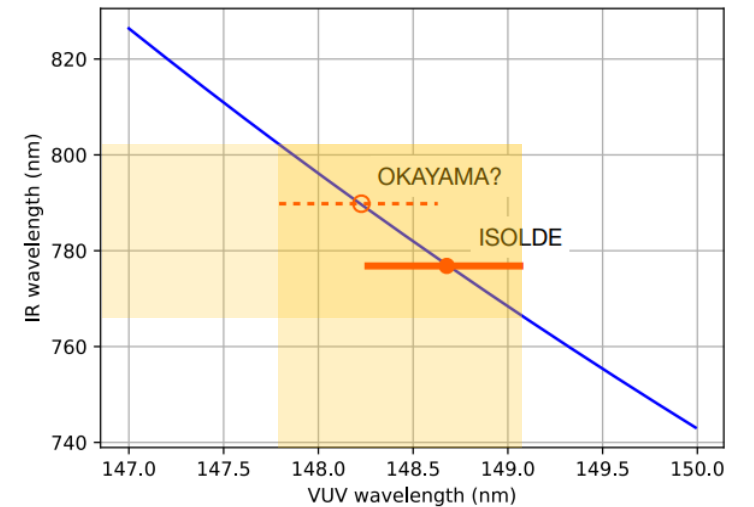
$$\Omega_{VUV} = \Omega_1 + \Omega_1 - \Omega_2$$



IRレーザーパワーと
VUVレーザーパワーの関係

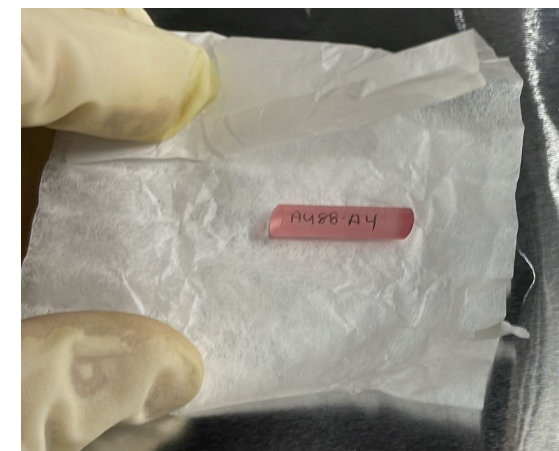
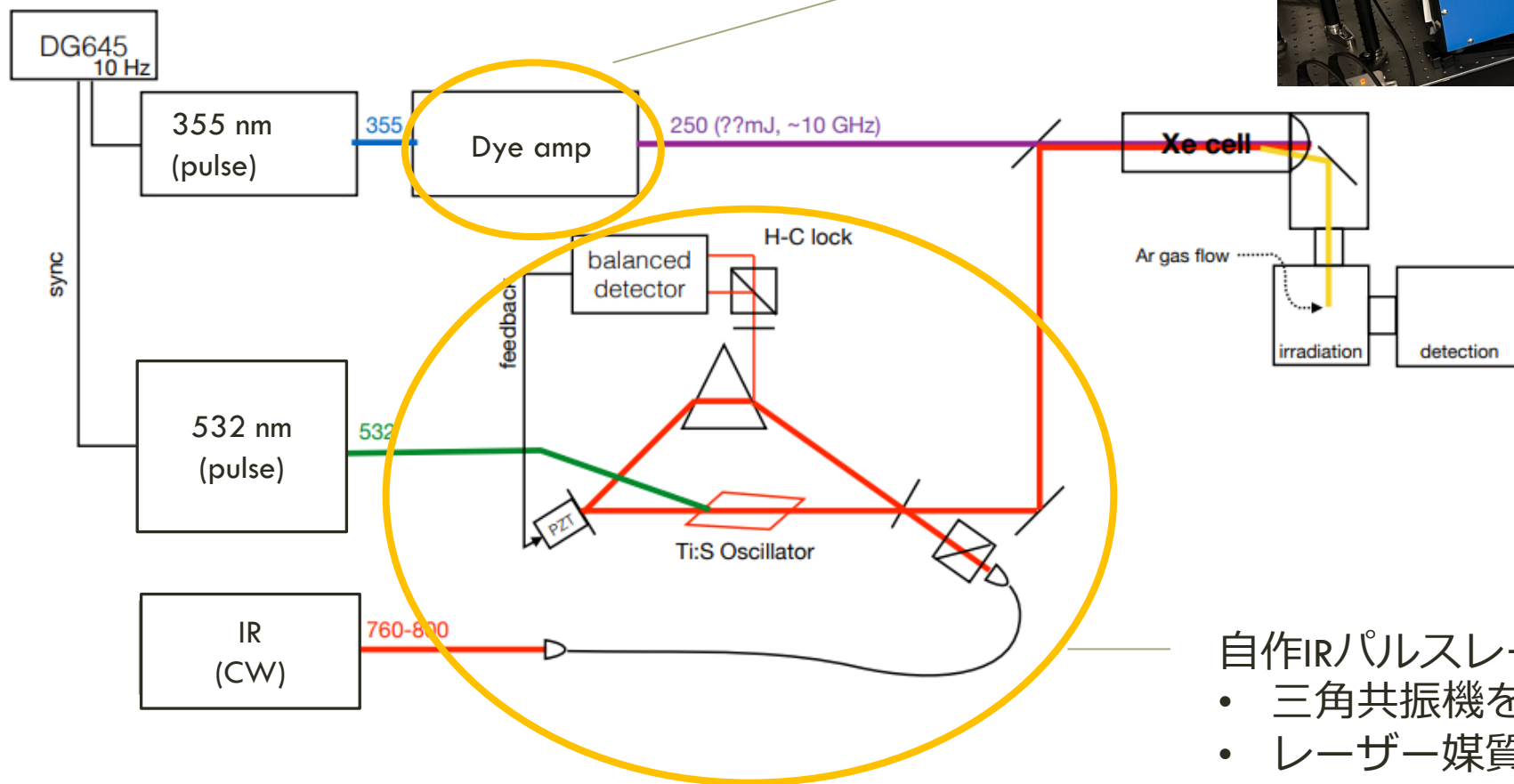


スキャン幅予定



2-3. VUVレーザー案

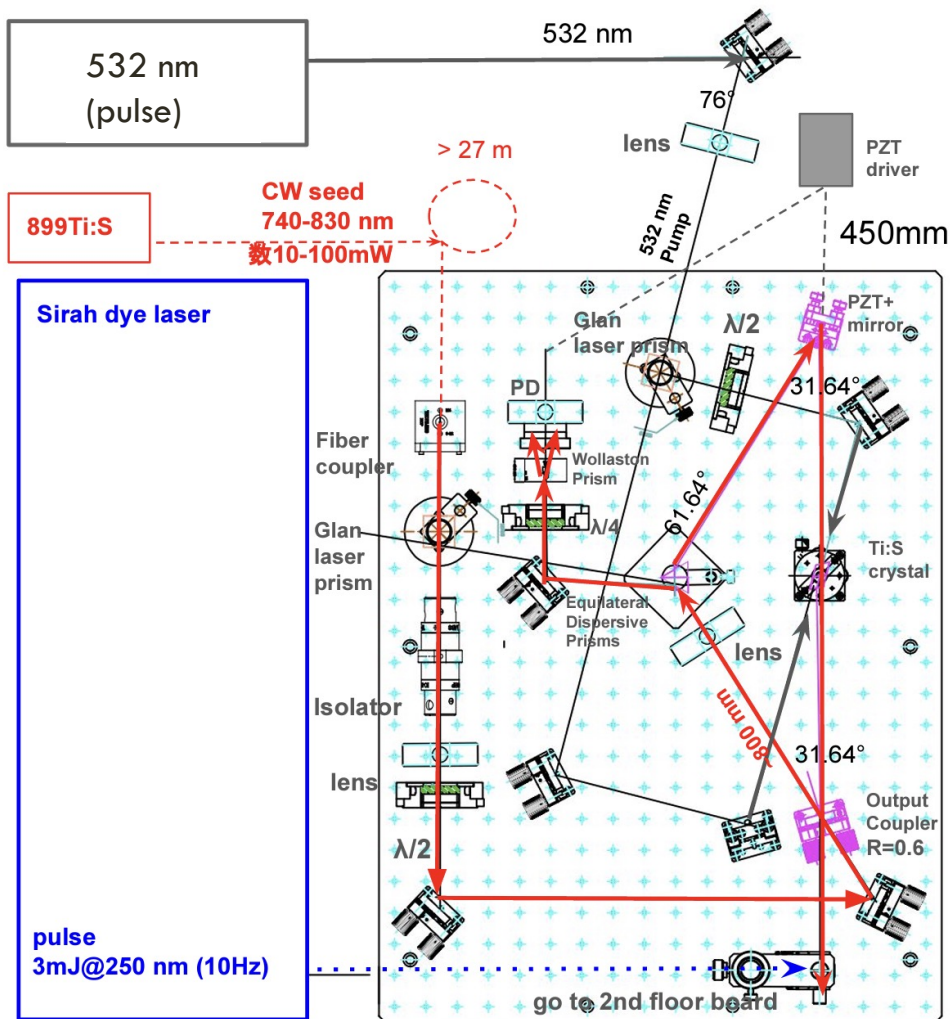
色素レーザー
(250 nm)



自作IRパルスレーザー

- 三角共振機を採用
- レーザー媒質はTiドープサファイア
- PZTでミラーを動かすことによって波長を変えられる

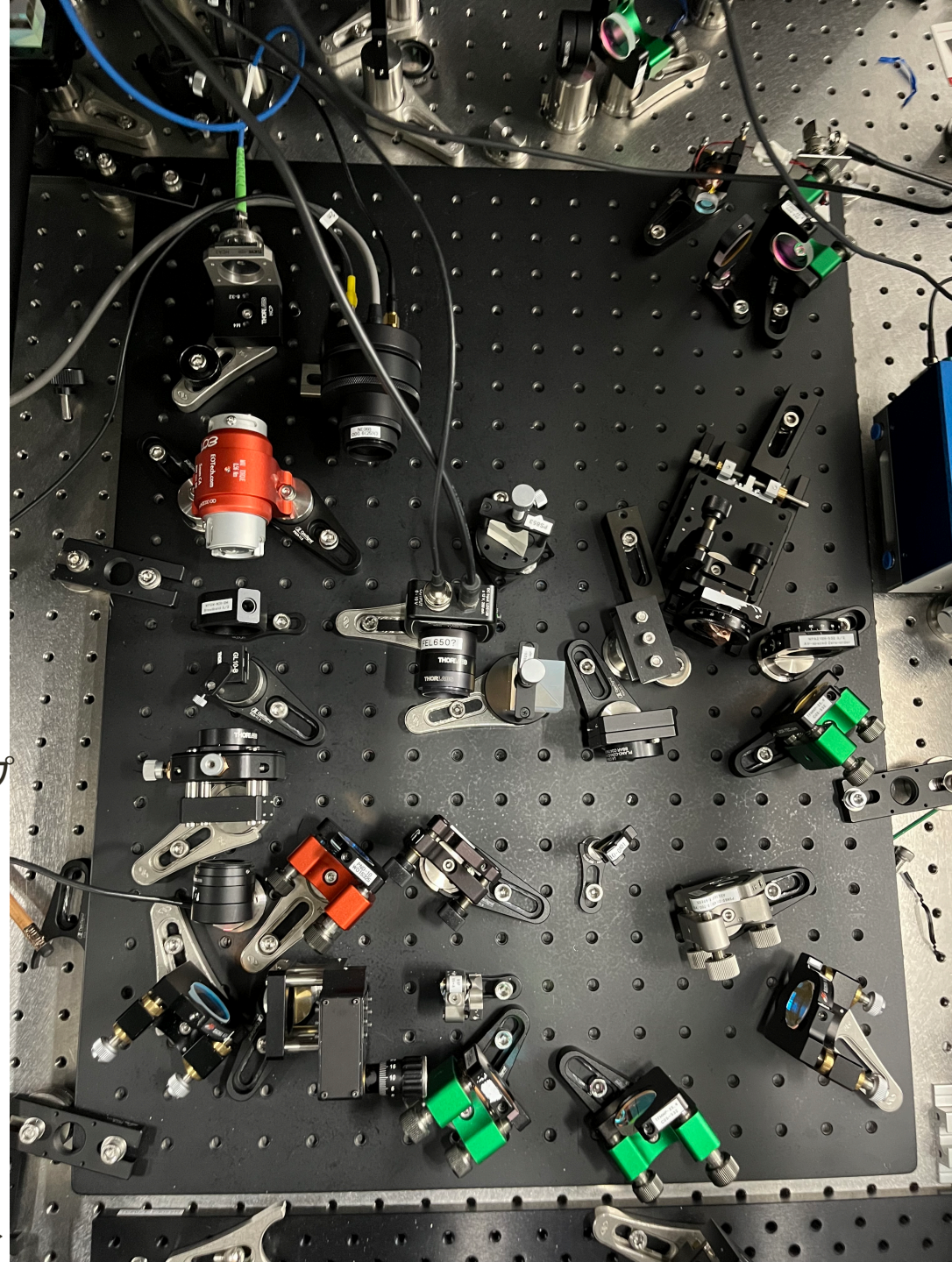
2-4. Ti:S共振器



600mm

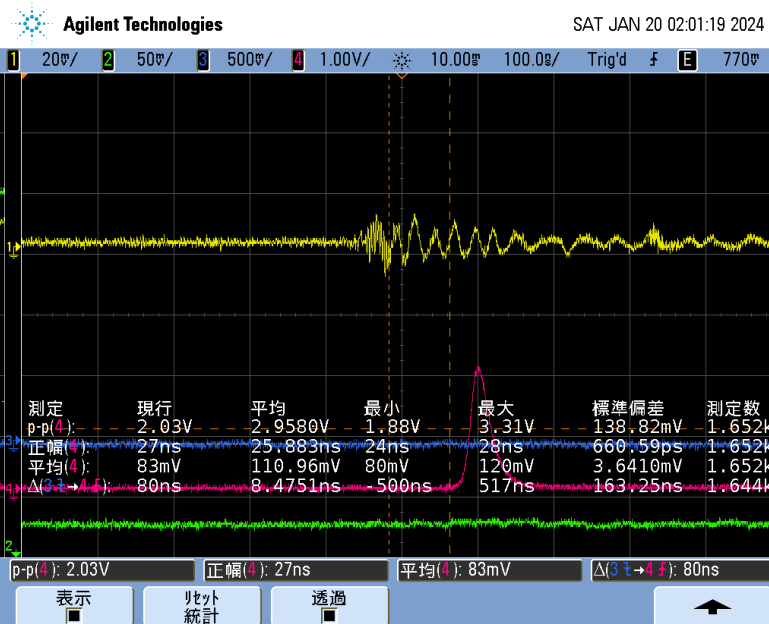
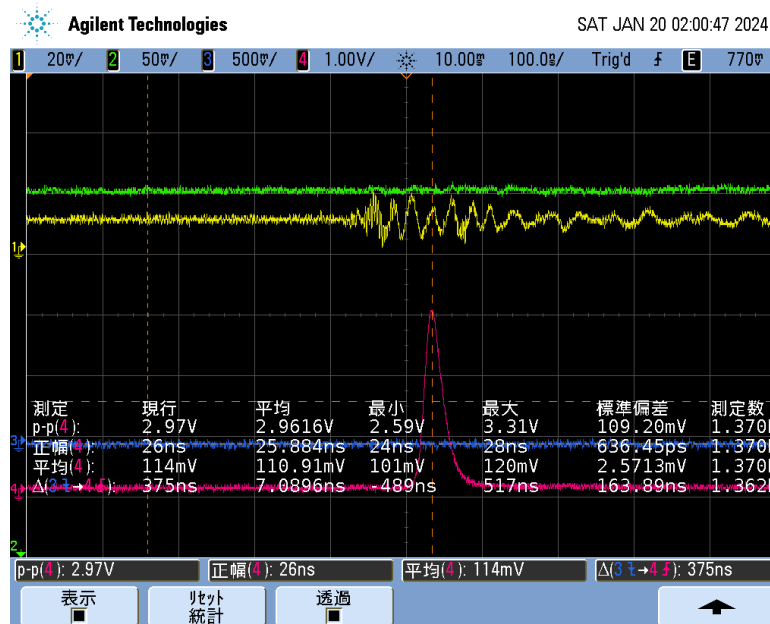
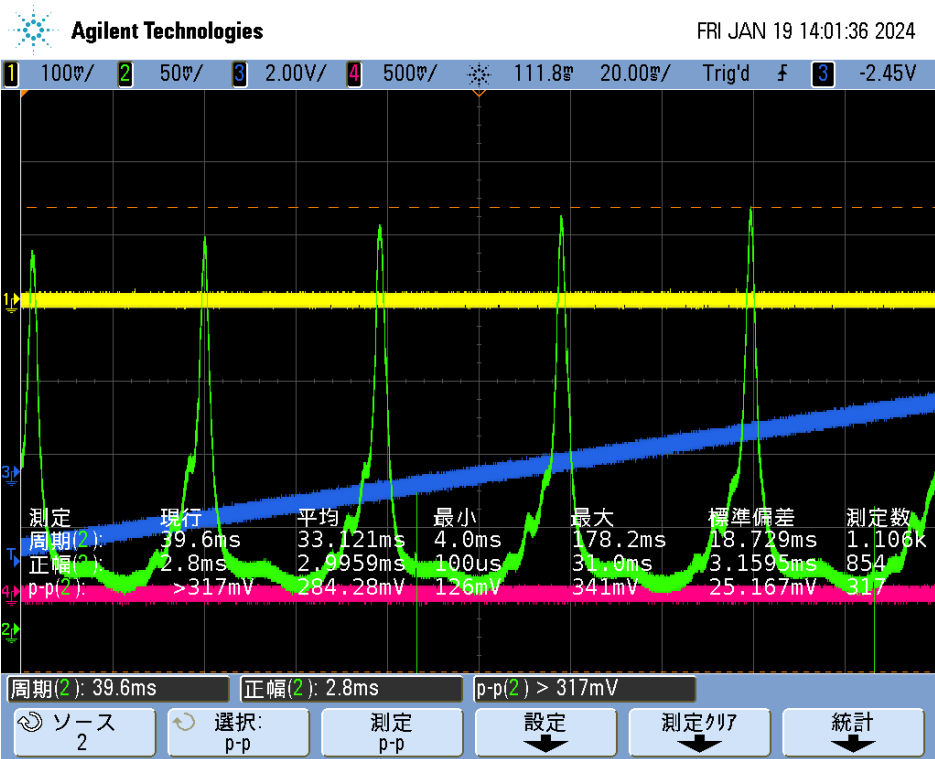
←設計図
(旧セットアップ案)

現在の
セットアップ→



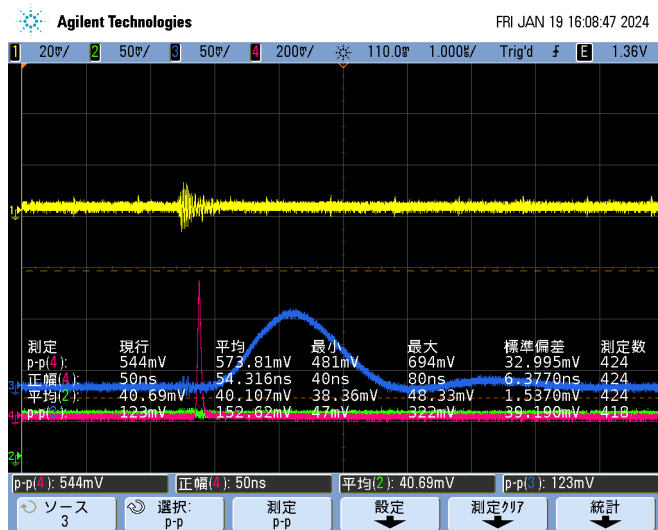
2-5. 共振器評価

共振器長をミラーからの透過が最大となるようにPZTを操作し、シード光とポンプ光を入射



パルシングを確認(赤線)

シード光を止めるとパルス強度が下がった



ファブリペロー干渉計でシード光と同じ波長が得られているか確認

→シード光からの誘導放出でレーザー光が得られている事を確認(青線)

※黄色はレーザー強度を安定させるシステムに係るシグナル

透過特性の共振器長依存性(緑線)

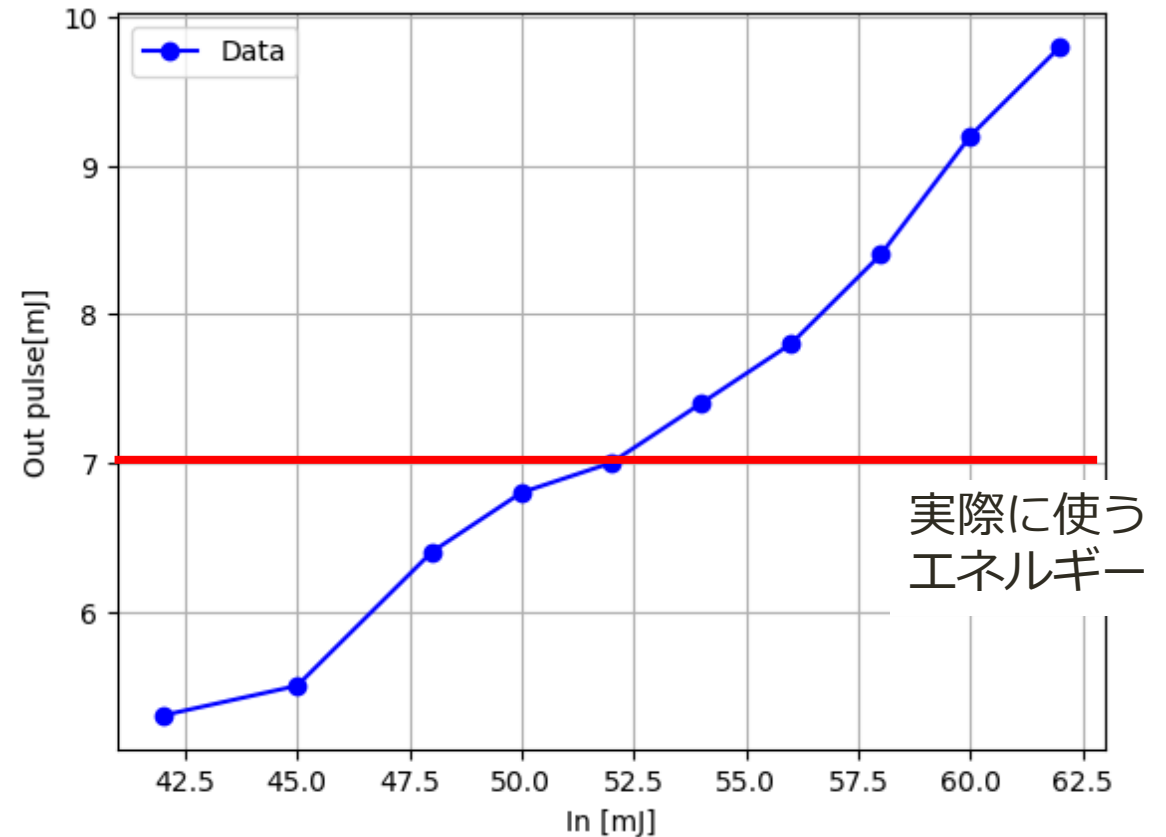
$$F = \frac{FSR}{FWHM} = \frac{39.6}{2.8} = 14.1$$

透過率からの計算値は15.1

2-6. パルスエネルギー評価

ポンプ光エネルギーとアウト
プットパルスエネルギーの関係

VUVレーザーシステムにインス
トールできるレベルの性能かク
イックに確認
→今後も進めていく予定

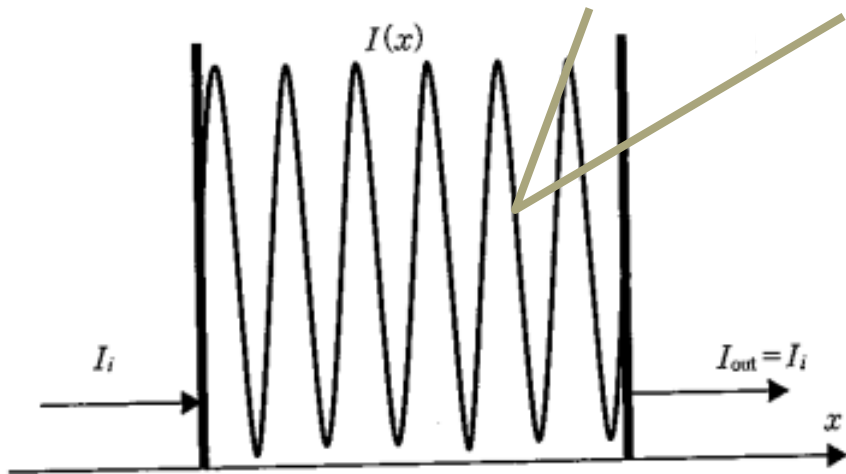
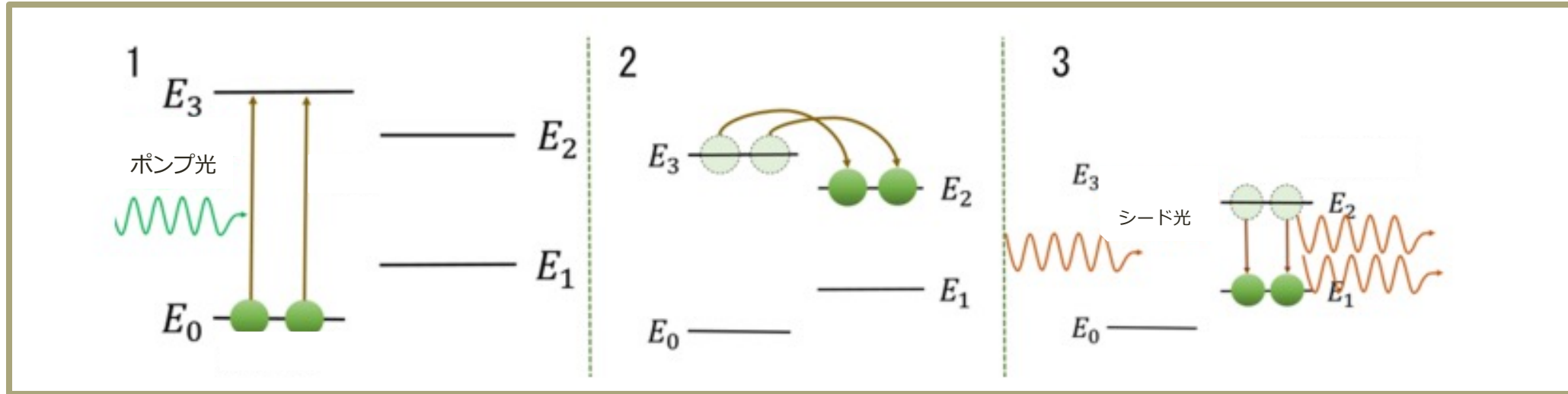


まとめ

- ^{229}Th 原子核時計は、超高精度測定を可能にし新しい物理法則の発見に貢献する可能性を有している。
- 現在アイソマー準位励起レーザーの開発に取り組んでおり、VUVレーザーシステムに組み込む予定のIRパルスレーザー開発に着手した。
- 今後は実際に4光波混合によってVUVレーザーを得られるか試みる予定。
 - レーザーの狭線幅化

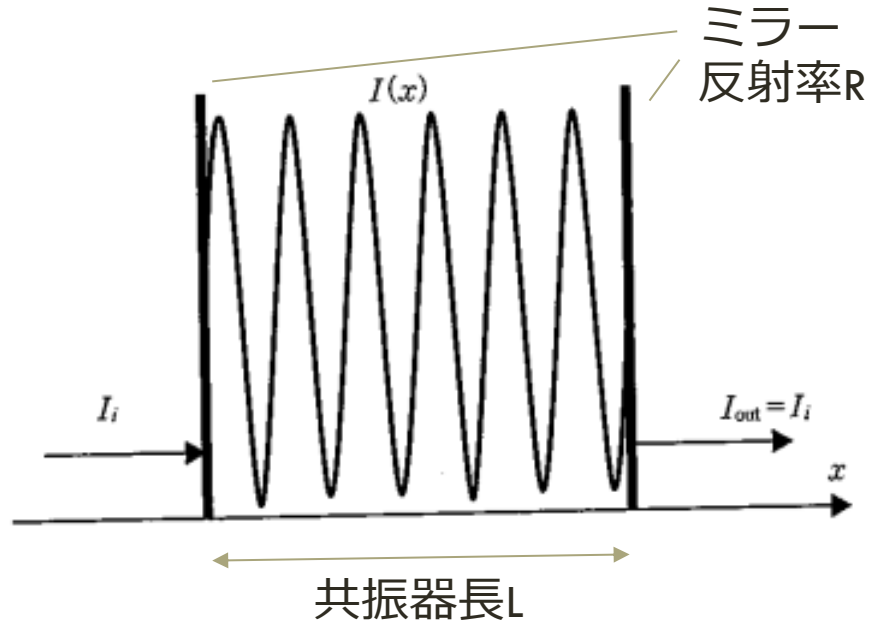
BACK UP

レーザー

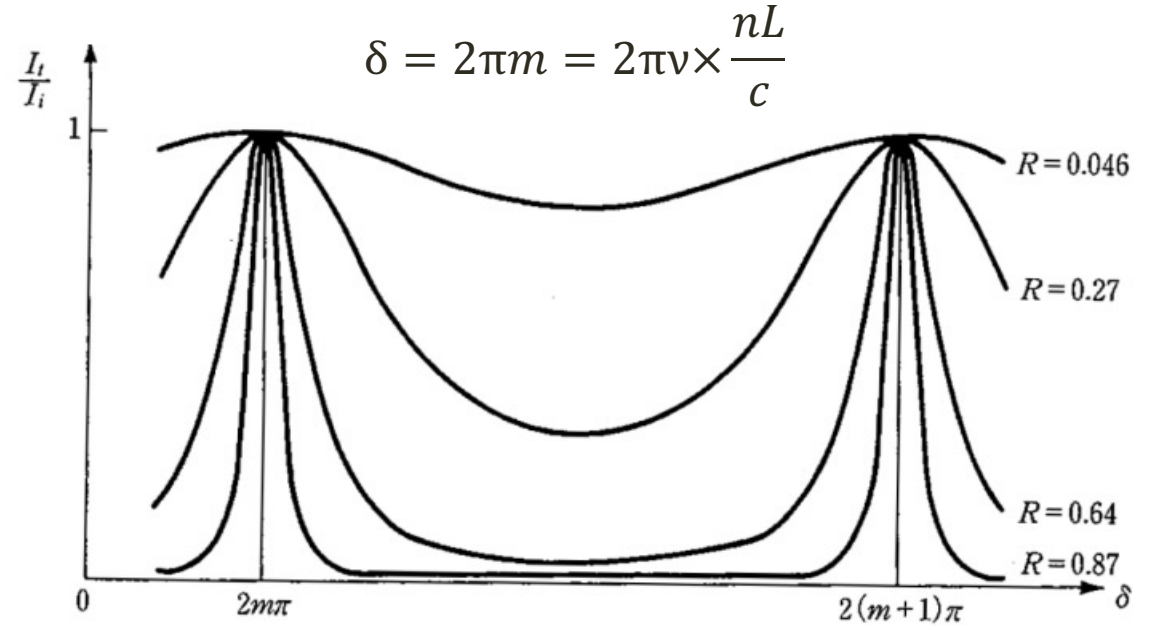


- 可干渉性
- 単色性
- 指向性
- 高い光強度

共振器



透過特性の共振器長依存性

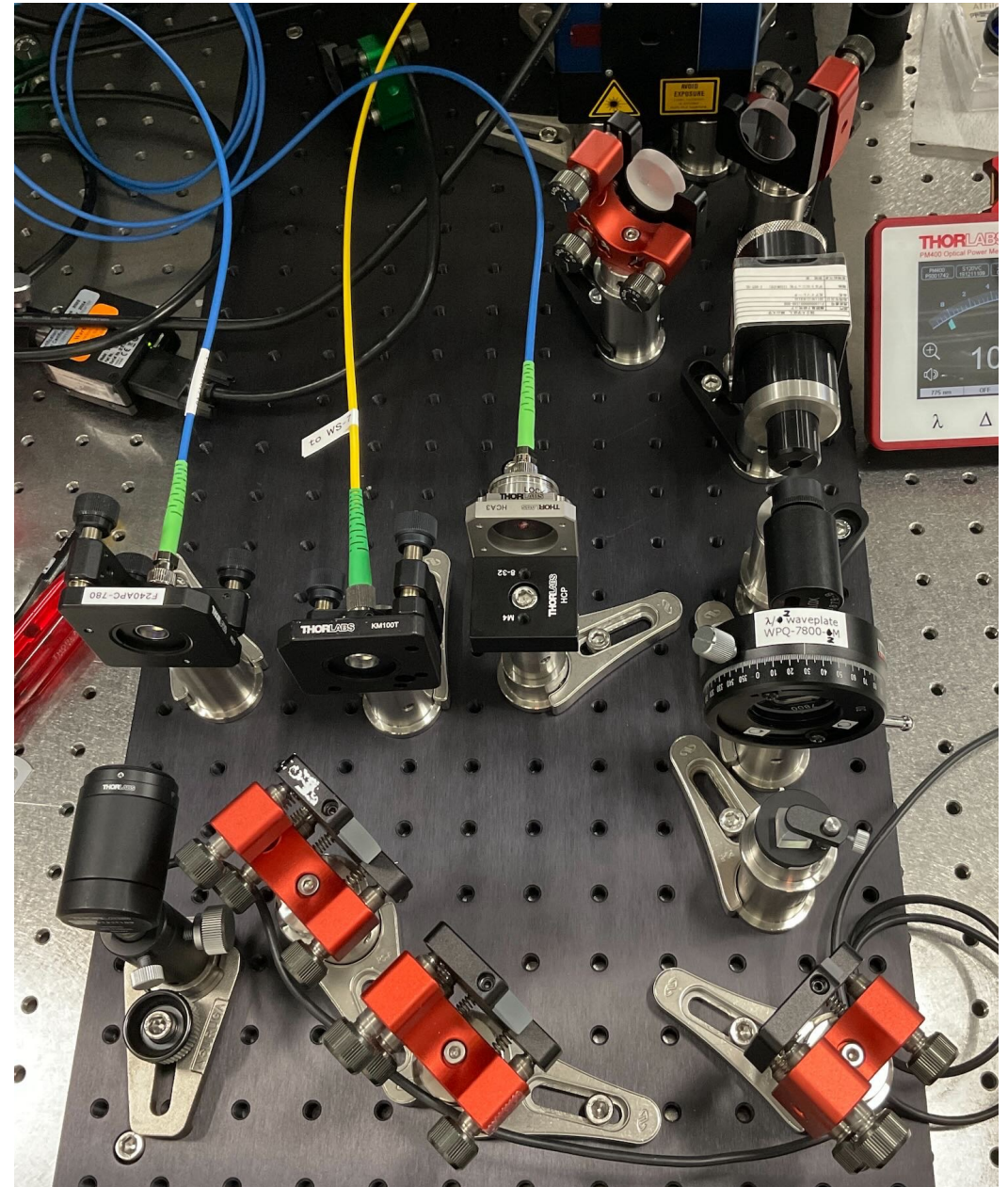
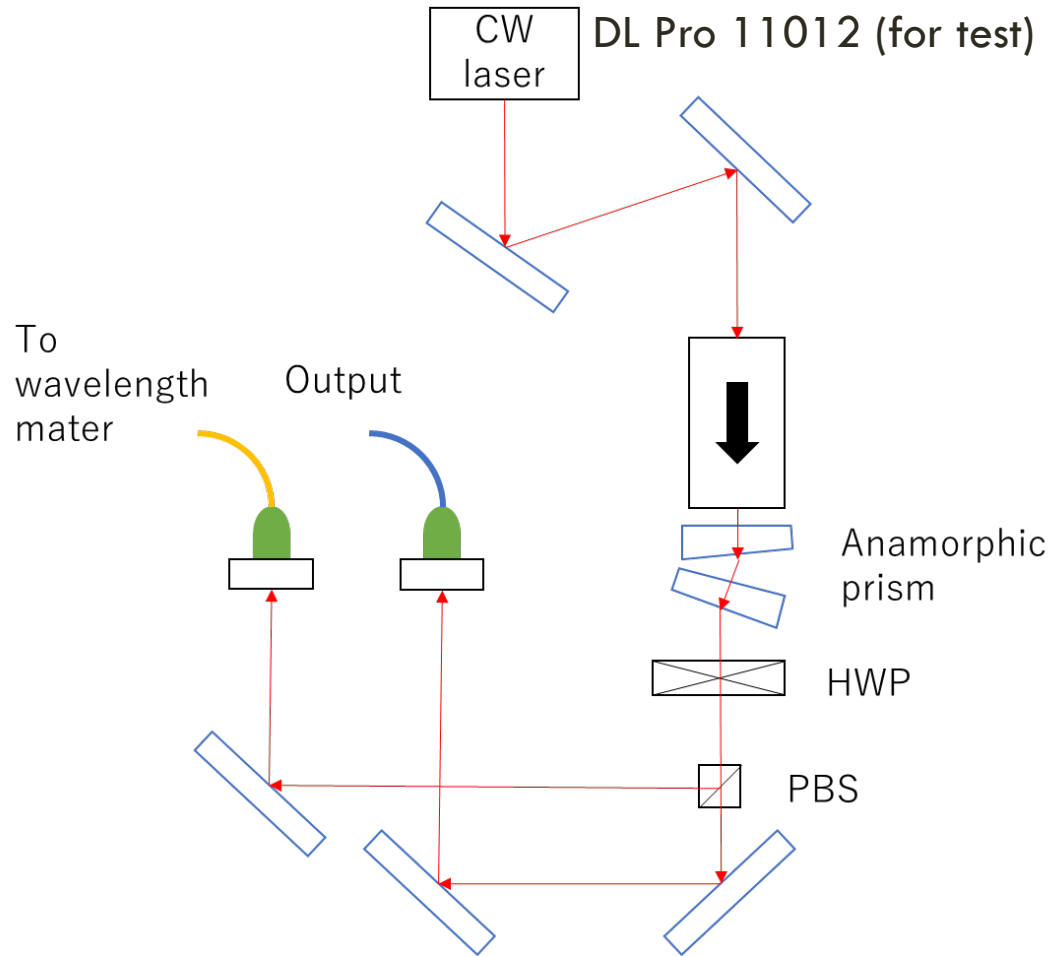


共振器の性能評価にはフィネスと呼ばれる分解能パラメータFを用いる

自由スペクトル領域(FSR)

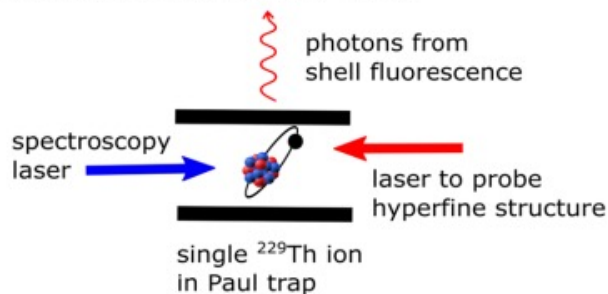
$$F = \frac{\pi(R_{tot})^{\frac{1}{4}}}{1 - (R_{tot})^{\frac{1}{2}}} = \frac{\text{FSR}}{\text{FWHM}}$$

シード光

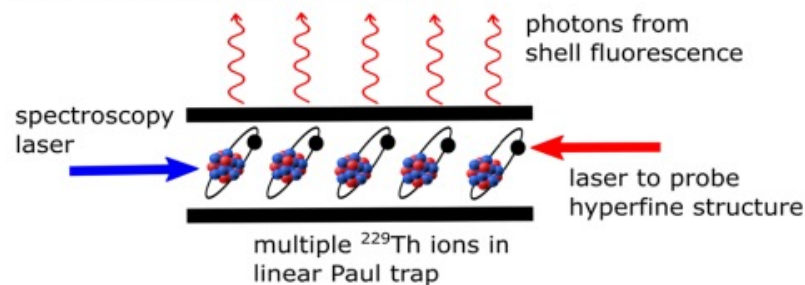


原子核時計の精度

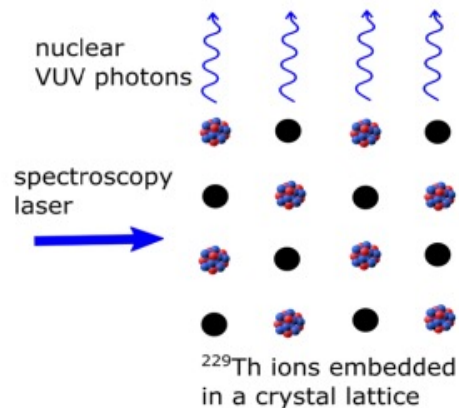
(a) single ion nuclear clock



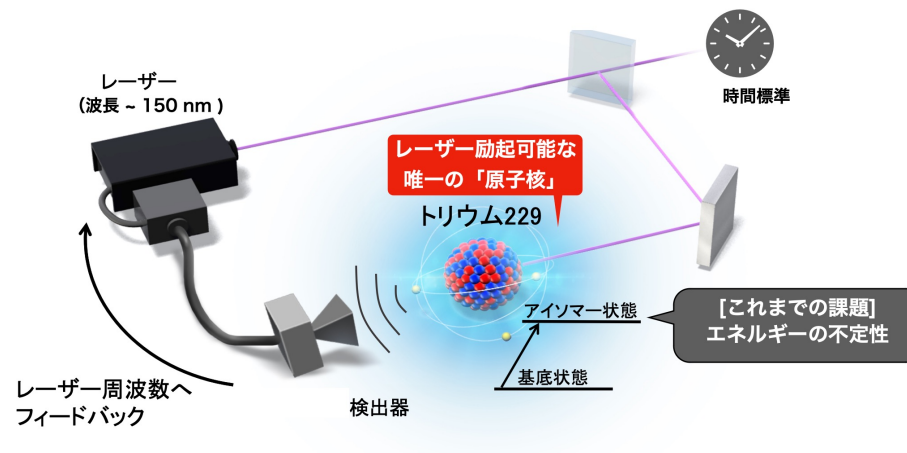
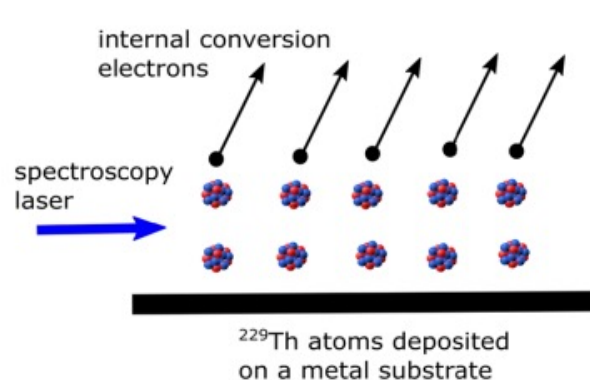
(b) multiple ion nuclear clock



(c) crystal-lattice nuclear clock



(d) internal conversion nuclear clock



「1秒」の定義の更新

相対論的測地学

微細構造定数の時間依存性の検証

ダークマター、ダークエネルギーの検証など...

Concept	Accuracy	Stability (τ in s)	τ_{\min}^*
Single ion	$\sim 1 \cdot 10^{-19}$	$\sim 5 \cdot 10^{-16} / \sqrt{\tau}$	~ 290 days
Multiple ion	$\sim 1 \cdot 10^{-19}$	$\sim 5 \cdot 10^{-17} / \sqrt{\tau}$	~ 2.9 days
Crystal lattice	$\sim 2 \cdot 10^{-16}$	$\sim 4.5 \cdot 10^{-13} / \sqrt{\tau^3}^{**}$	~ 170 s
Internal conversion	$\sim 2 \cdot 10^{-16}$	$\sim 7 \cdot 10^{-15} / \sqrt{\tau}^{***}$	~ 1200 s

L. Wense *et al.*, Eur. Phys. J. A **56**, 277 (2020).

VUV光検出実験セットアップ

SPring-8



X-ray

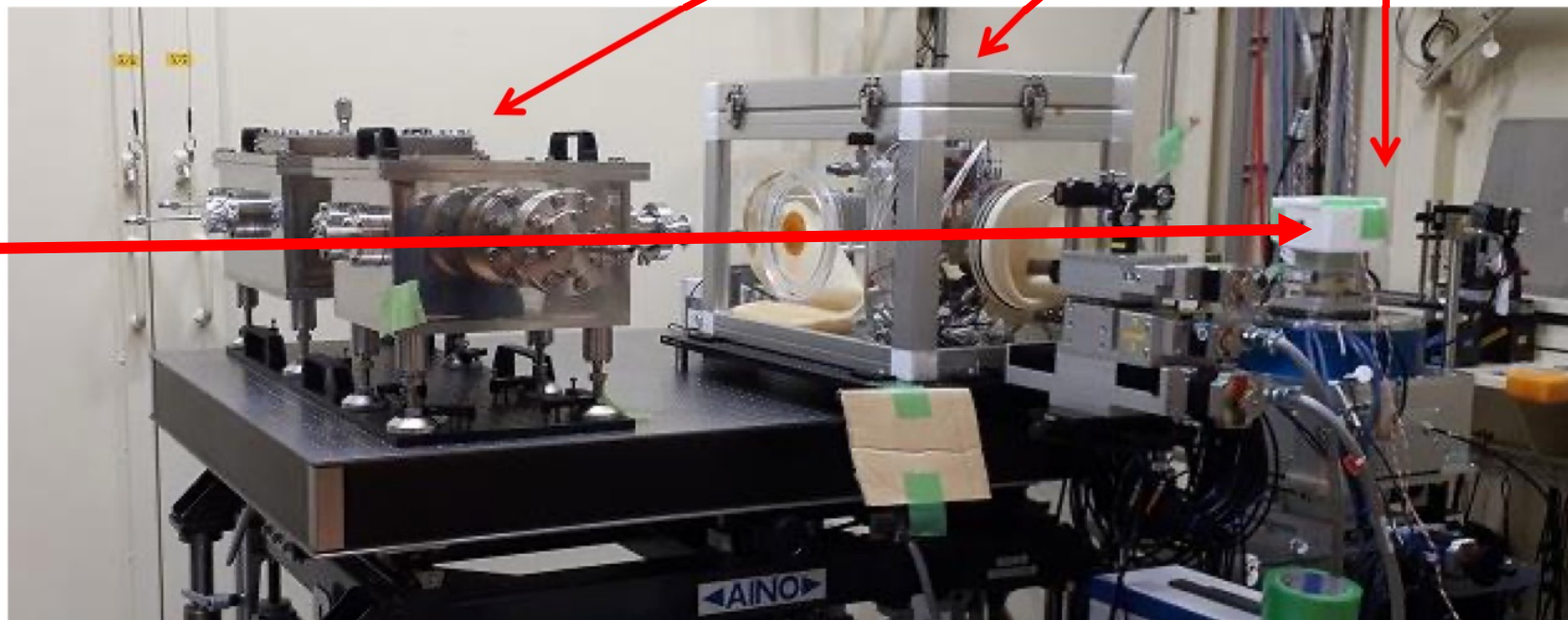
モノクロメーター

VUV光検出セットアップ

NRS信号検出
セットアップ

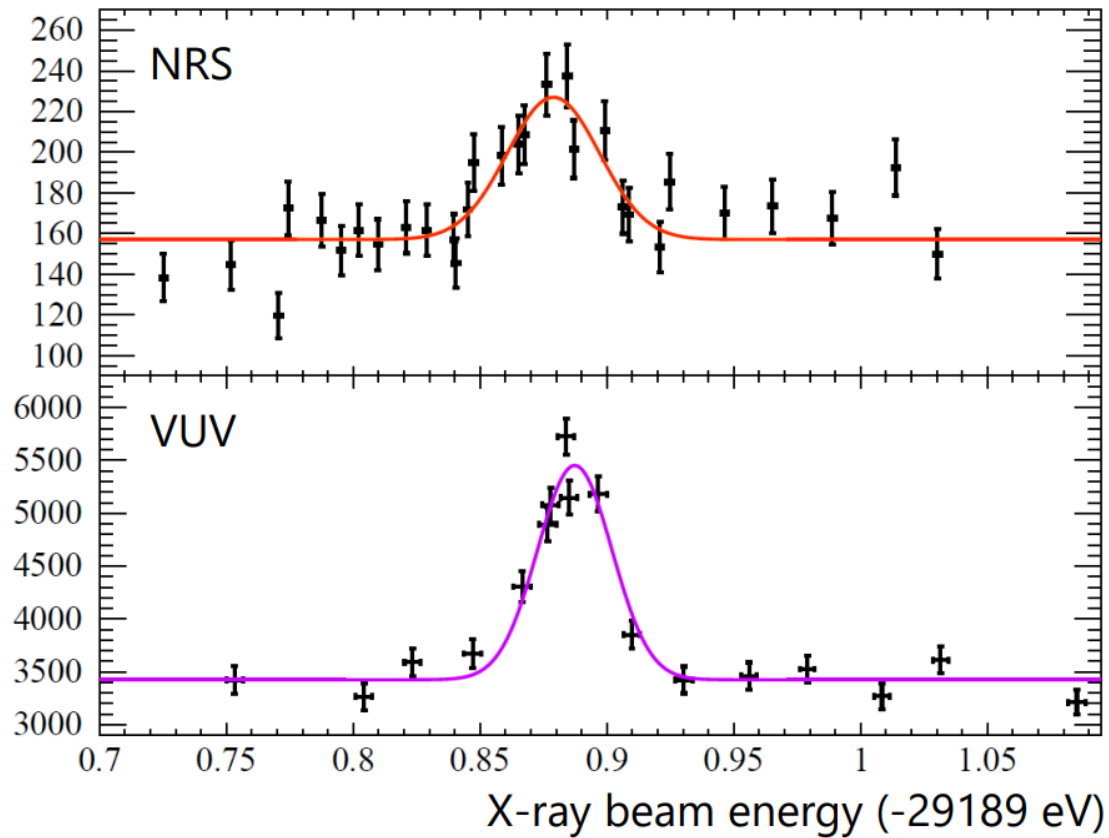
X線エネルギー測定
セットアップ

X-ray

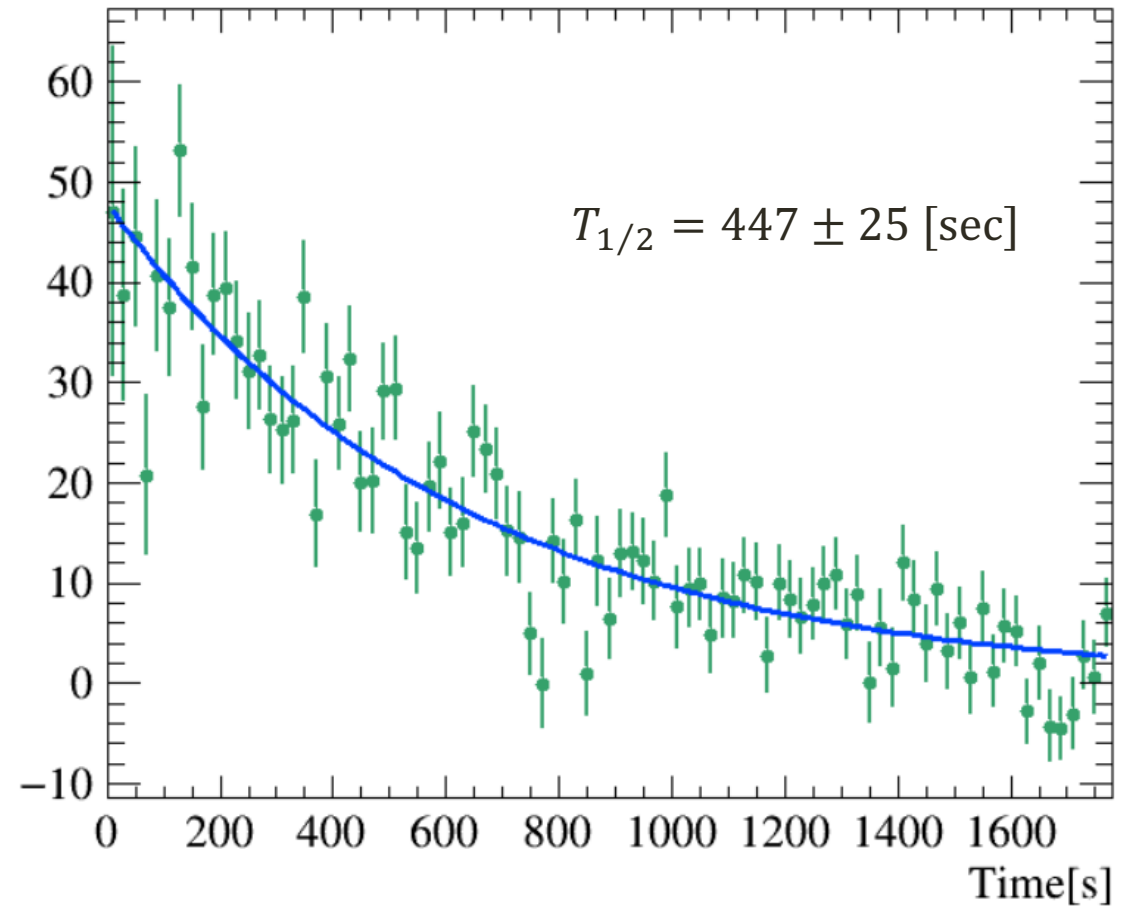


OUR RECENT RESULTS

number of events

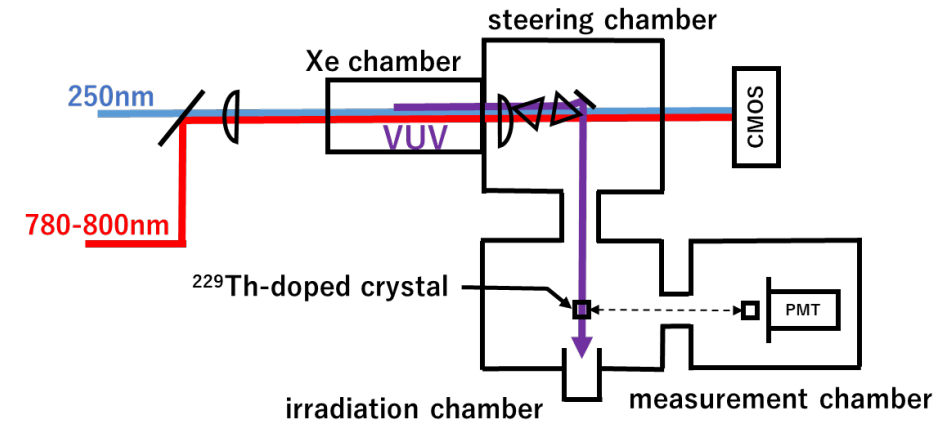
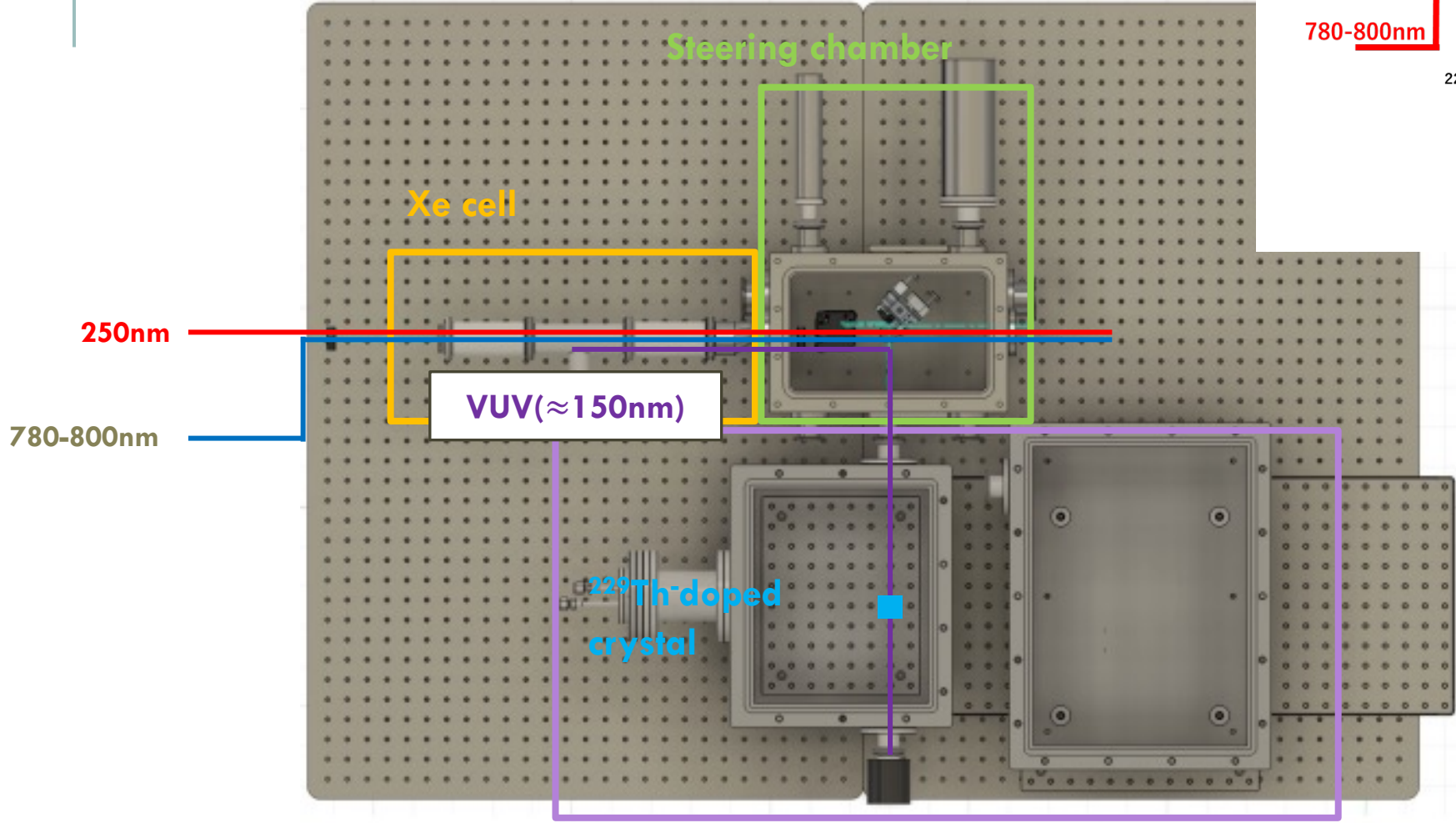


Counts / 20 s/set (15+15 sets)



Isomer excitation from the ground-state

SETUP PLAN (DOWN STREAM)



VUV detection setup