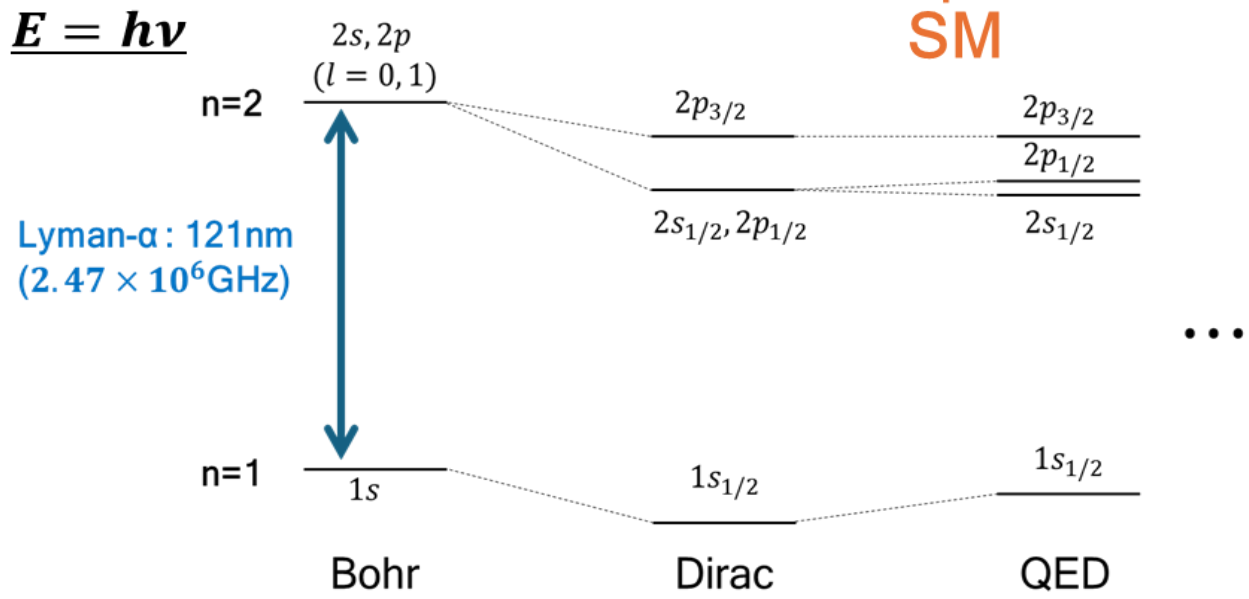


Muonium 1S-2S 共振器内分光

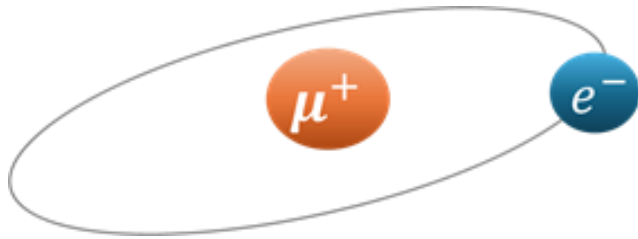
岡山大学異分野基礎科学研究所(RIIS) 遠藤礼

- Low Energy Physicsは原子のエネルギー準位の精密測定
→ SMの検証 & 新物理探索

$$E_{tot}(n, j, l, F) = \underbrace{E_D}_{\text{Dirac}} + \underbrace{E_{RM}}_{\text{Reduced Mass}} + \underbrace{E_{QED} + E_{HFS} + E_{weak}}_{\text{SM}} + \underbrace{E_{BSM}}_{\text{BSM}}$$



- ミューオニウム1s-2s共振器内分光実験
 - Intro
 - Method
 - Doppler effect
 - Cavity Design
 - Result
- 真空環境でのUVオプティクスの劣化
 - Discussion
 - Method
 - Result
- Summary



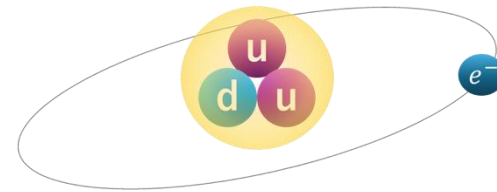
ミューオニウム(Mu)

純レプトン系の水素様原子 ($\mu^+ + e^-$)

- 構造不定性が無く精密理論計算可能
- エキゾチック原子の中では長寿命

$$\tau = 2.2 \text{ us}$$

(o-Ps : 142 ns, p-Ps : 125 ps)



水素

ハドロン+レプトン ($p + e^-$)

- Nuclear finite size effect
(Proton Radius Puzzle)

素粒子標準理論(QED, 電弱相互作用など)の
高精度検証が可能

- 目的：ミューオン質量の高精度決定

- ミューオン質量の不確かさ

→ミューオンに関わる基礎物理定数の検証に制限

ex) ν_{1s-HFS} (Theory)の不確かさ : 515 Hz ($m_\mu = 511$ Hz)

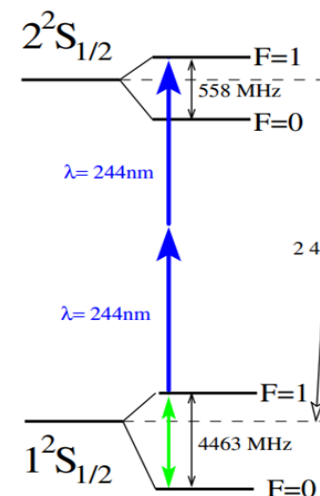
M. I. Edies, Phys. Lett. B 795, 113 (2019)

- 1s-2s Transition

$$\Delta\nu_{1s2s} \approx \frac{3\alpha^2}{8h} m_e c^2 \left(1 + \frac{m_e}{m_\mu} \right)^{-1}$$

- 換算質量(0.5%) → m_μ の高精度決定
- 1光子禁制遷移. → 対向2光子励起

(Doppler free)



[The History of Mu 1s2s]

most accurate result
Uncertainty : 9.8MHz

KEK(JPN)

RAL(U.K.)

J-PARC (JPN)
PSI (CHE)

J-PARC : Pulsed muon beam
PSI : CW muon beam

1988

2000

TODAY

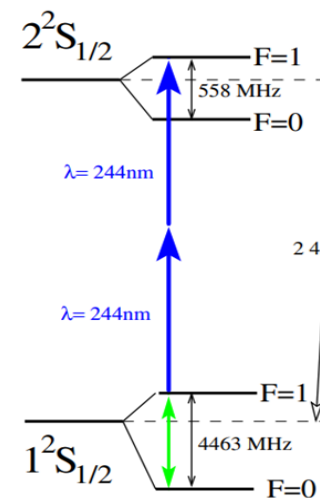
- 目的：ミューオン質量の高精度決定

- ミューオン質量の不確かさ

→ミューオンに関わる基礎物理定数の検証に制限

ex) ν_{1s-HFS} (Theory) の不確かさ : 515 Hz ($m_\mu = 511$ Hz)

M. I. Edies, Phys. Lett. B 795, 113 (2019)



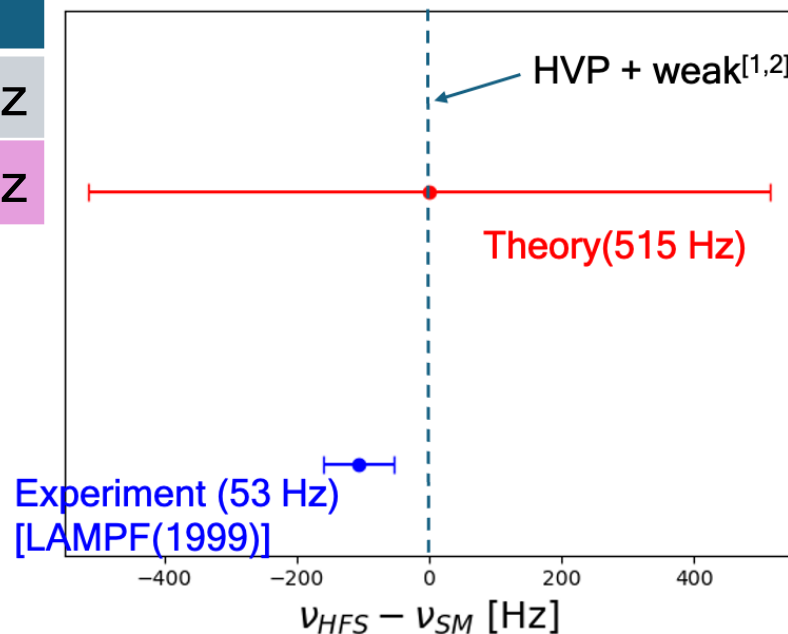
Uncertainty	$\delta\nu_{1s2s}$	m_μ	$\delta\nu_{HFS}$
RAL(2000)	9.8 MHz	820 ppb	4,000 Hz
LAMPF(1999) ^[3]		120 ppb	515 Hz

ppb... 10^{-9} (相対不確かさ)

[1] D. Nomura and T. Teubner, Nucl. Phys. B 867, 236 (2013).

[2] M. I. Edies Phys. Rev. A 53, 2953 (1996).

[3] W Liu *et al.*, Phys. Rev. Lett. 82, 711 (1999).



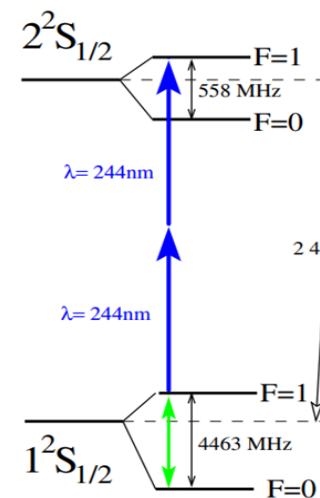
- 目的：ミューオン質量の高精度決定

- ミューオン質量の不確かさ

→ミューオンに関わる基礎物理定数の検証に制限

ex) ν_{1s-HFS} (Theory)の不確かさ : 515 Hz ($m_\mu=511$ Hz)

M. I. Edies, Phys. Lett. B 795, 113 (2019)



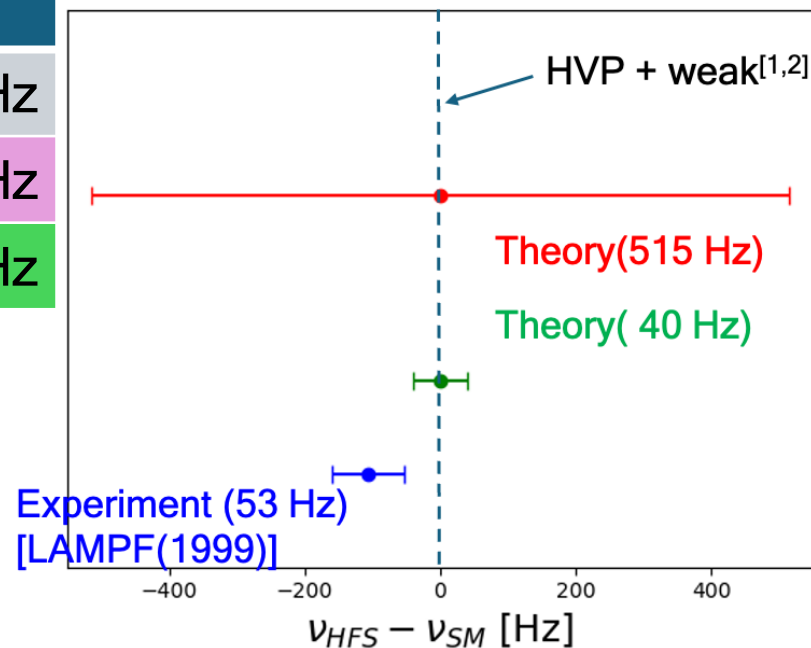
Uncertainty	$\delta\nu_{1s2s}$	m_μ	$\delta\nu_{HFS}$
RAL(2000)	9.8 MHz	820 ppb	4,000 Hz
LAMPF(1999) ^[3]		120 ppb	515 Hz
Target	100 kHz	8 ppb	40 Hz

ppb... 10^{-9} (相対不確かさ)

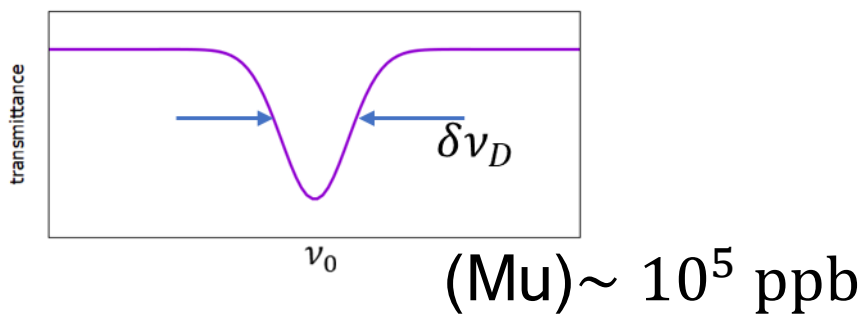
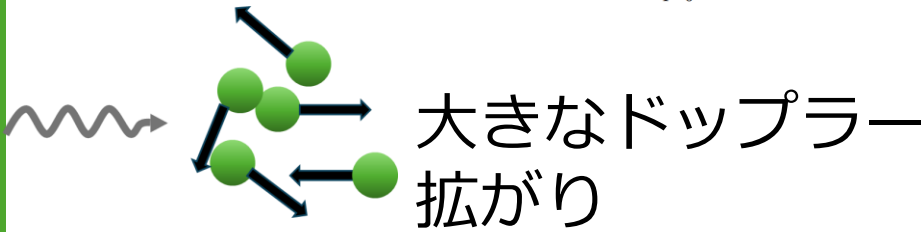
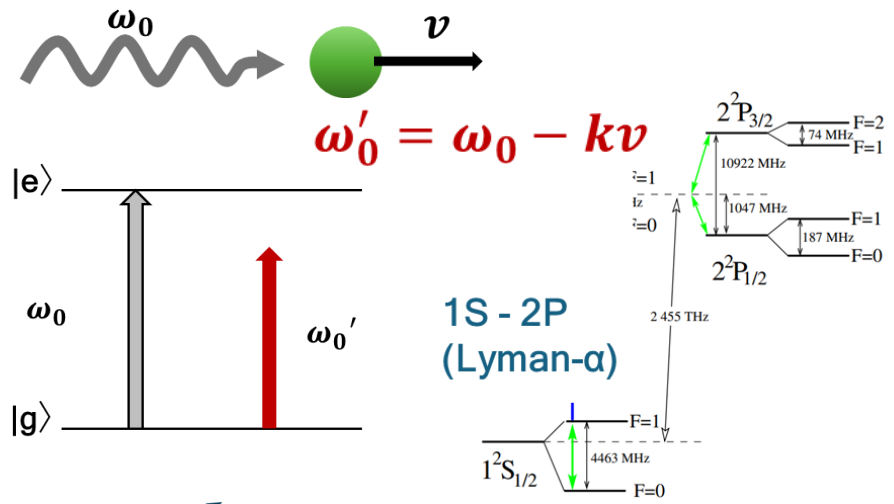
[1] D. Nomura and T. Teubner, Nucl. Phys. B 867, 236 (2013).

[2] M. I. Edies Phys. Rev. A 53, 2953 (1996).

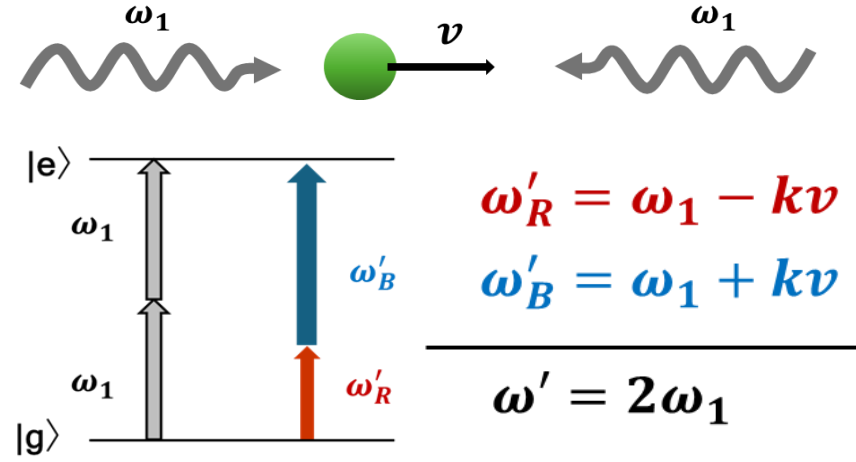
[3] W Liu *et al.*, Phys. Rev. Lett. 82, 711 (1999).



1光子励起

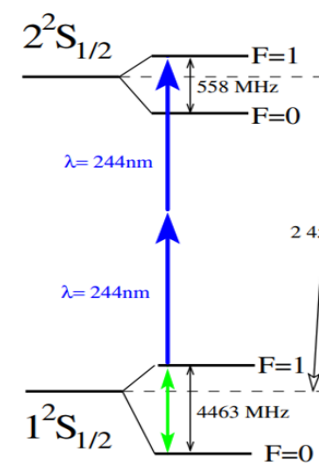


対向2光子励起



Doppler Free !!

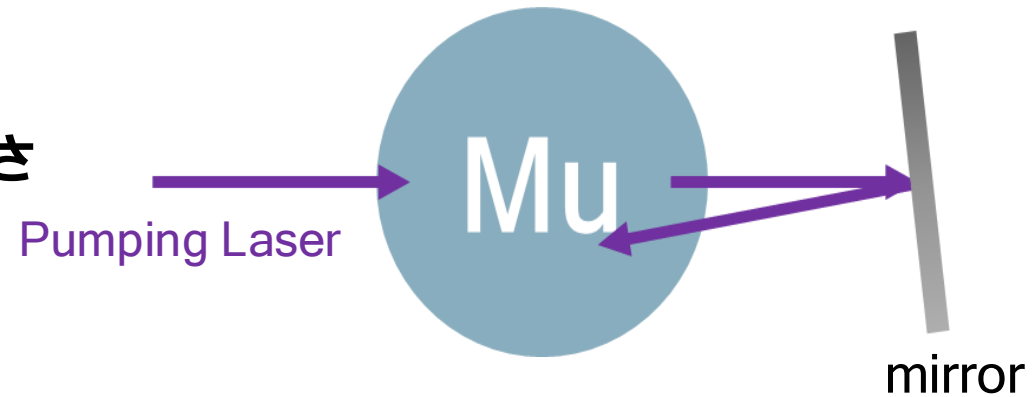
より精密な測定



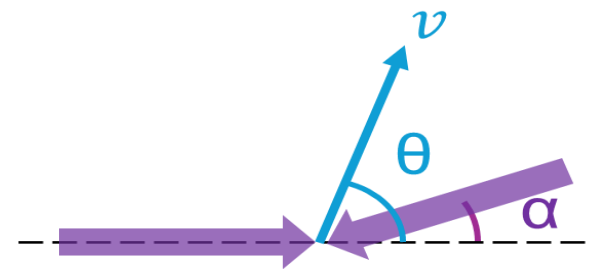
Method - 残留ドップラーシフト

- 対向2光子励起：ドップラーシフトはキャンセル
- 対向が完璧でない → 残留ドップラーシフト

ミラーの角度不定性
⇒ 残留ドップラーシフト不確かさ



Uncertainty	/MHz
Total	9.8
Statistics	9.1
Res. Doppler	3.4
linewidth	1.2
Freq. calib	0.8



$$\nu_{Res.Dop} \approx \alpha \frac{v}{c} \sin\theta \times \nu_{1s-2s}$$

$$\approx 2.4 \pm 0.7 \text{ [MHz]}$$

V Mayer et al. Phys. Rev. Lett. 84, 1136(2000)

日本物理学会春季大会
嵯峨, 24aA1-9(2023.3月)

Method - 残留ドップラーシフト

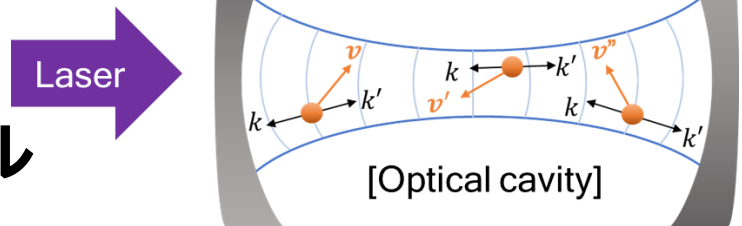
- 対向2光子励起：ドップラーシフトはキャンセル
- 対向が完璧でない → 残留ドップラーシフト



[光共振器]

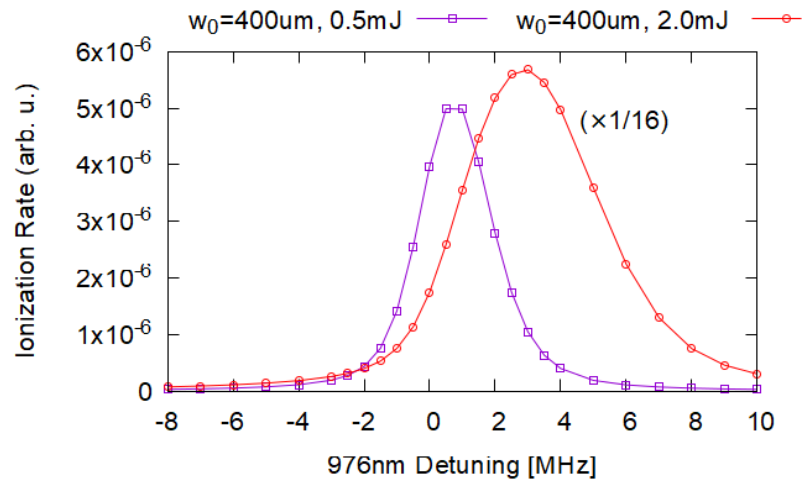
ミラーの間で光を往復させ、定在波を作り出す装置
→波面のズレが発生せず、対向が完璧

⇒残留ドップラーシフトをキャンセル



- 2光子励起レート $\propto I^2$

(I : ビーム強度 [J/cm²])

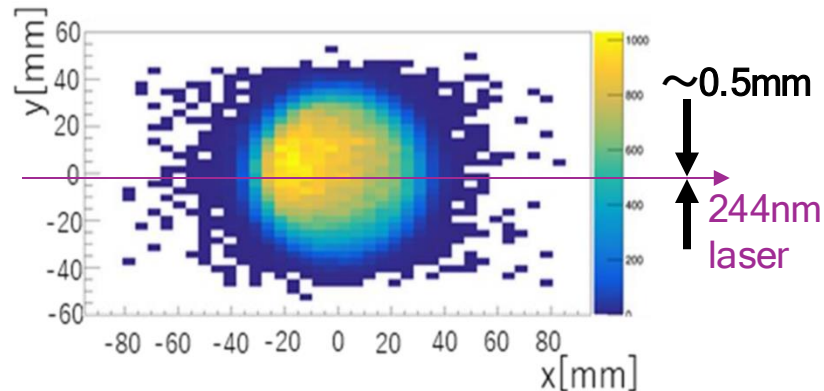


ビーム径同じ
強度4倍

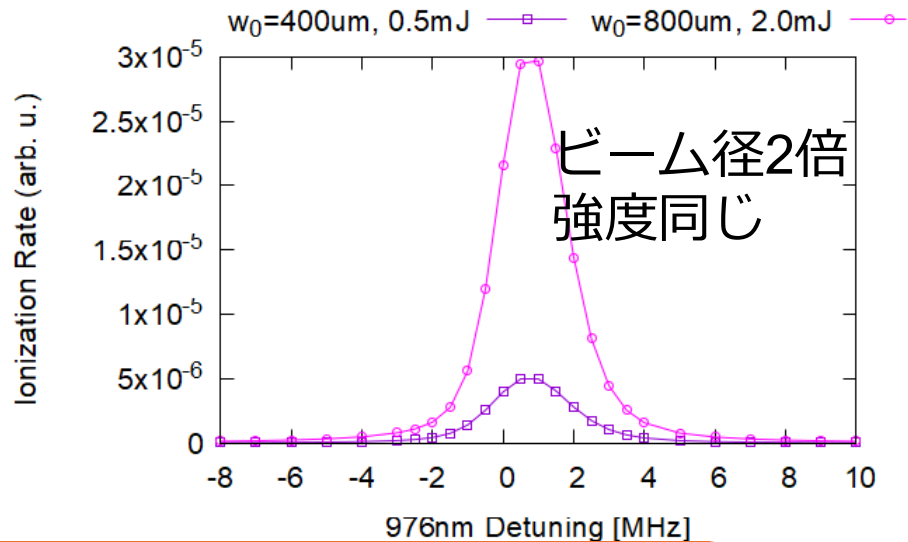
パルスレーザー励起

- 励起スペクトルの線幅拡大 (AC Starkシフト)
- オプティクスが焼ける恐れ

- Mu分布に対してビーム径細い



日本物理学会春季大会, 嵯峨, 24aA1-9(2023.3月)



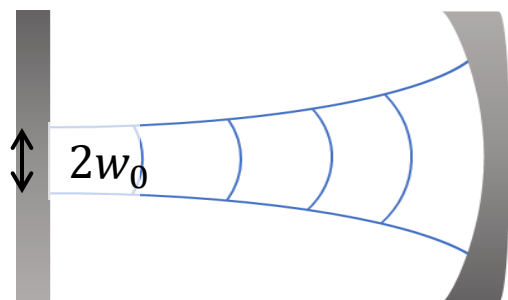
ビーム径2倍
強度同じ

強度を上げるより、径を広げる方がメリット大きい

[共振器への要請]: レーザー径を大きくしたい

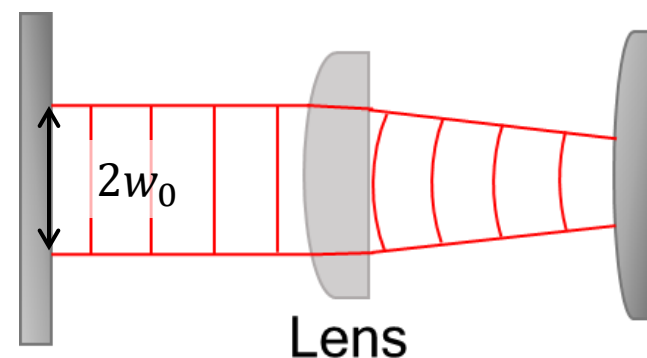
- 凹ミラー共振器

- ミラーの曲率半径を大きくする (かなり大きくする必要がある)



- 凸ミラー+レンズ共振器

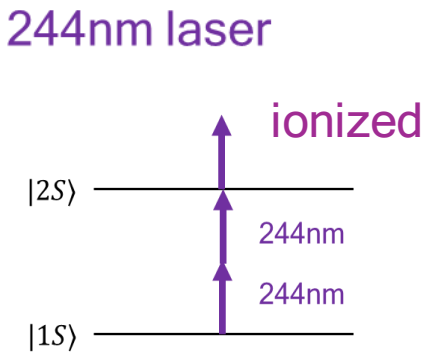
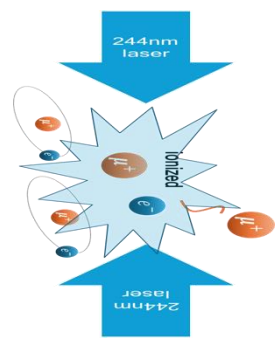
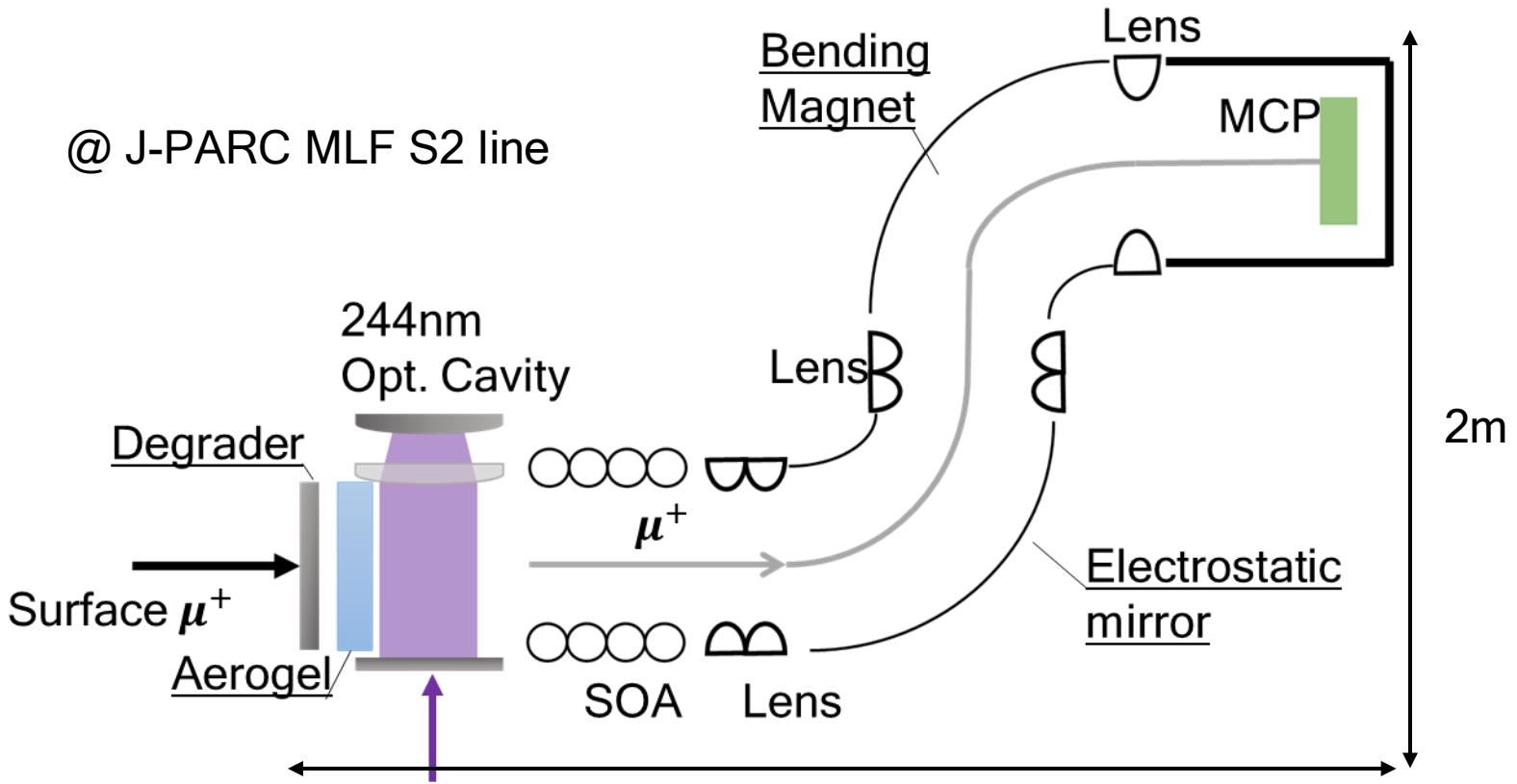
- ビーム径の拡大が容易



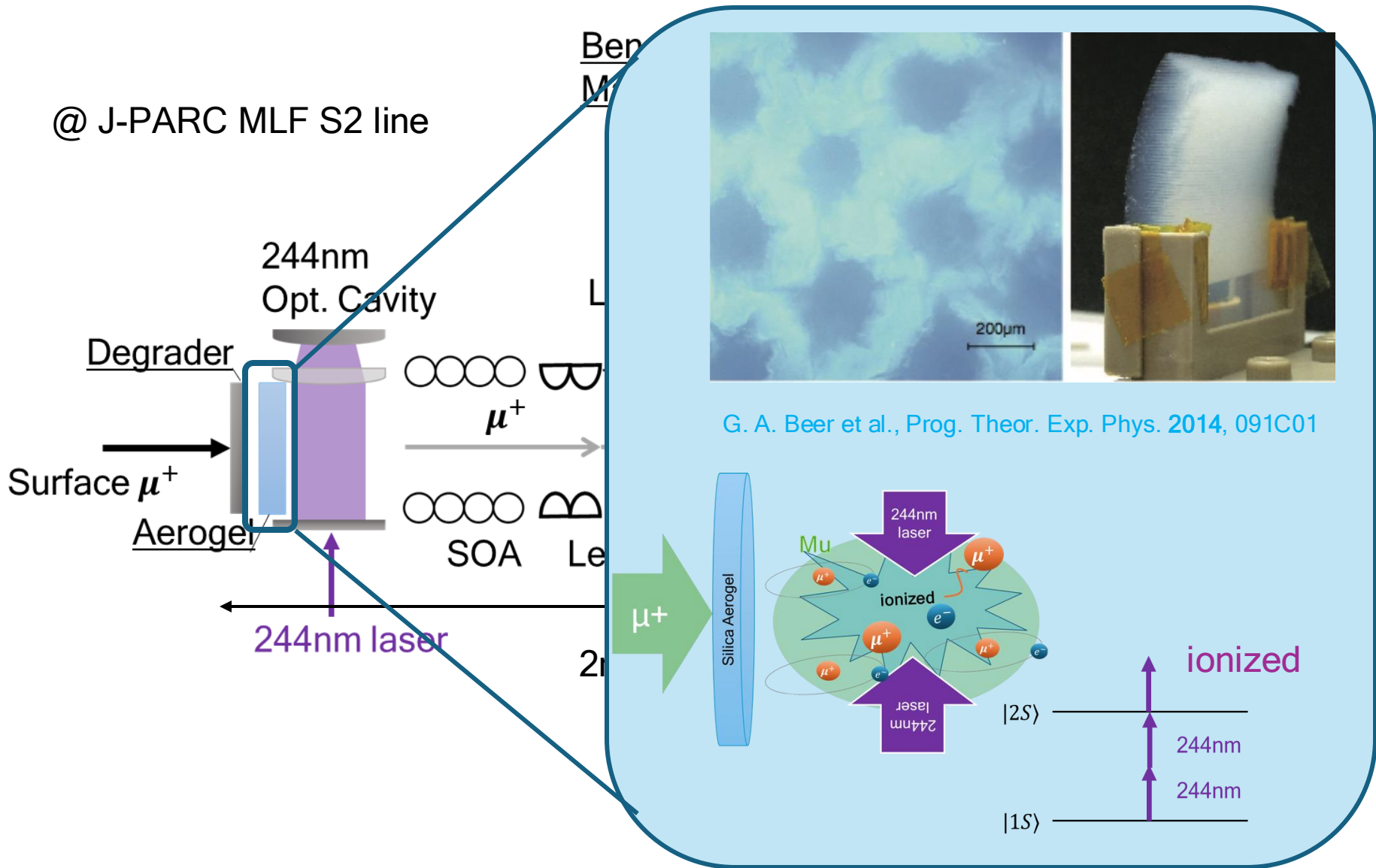
Cavity長 260 mm

(mirror)	R =	20,000	mm
(lens)	f =	—	
waist size	$w_0 =$	0.42	mm

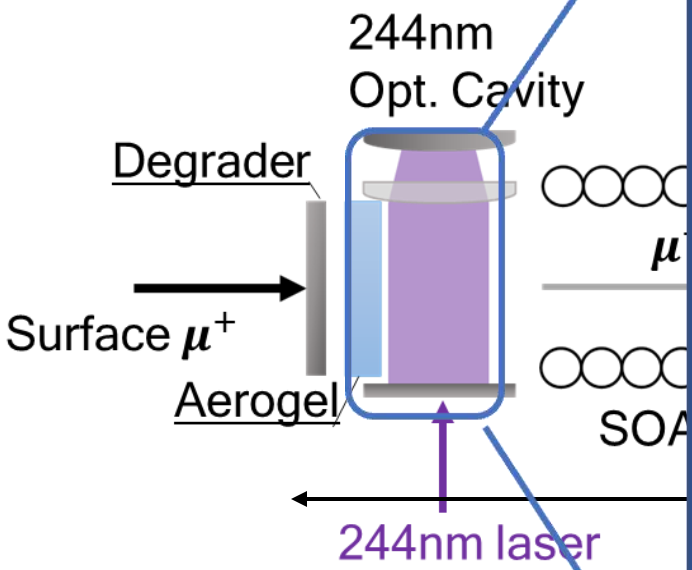
	R =	350	mm
	f =	400	mm
	$w_0 =$	0.67	mm



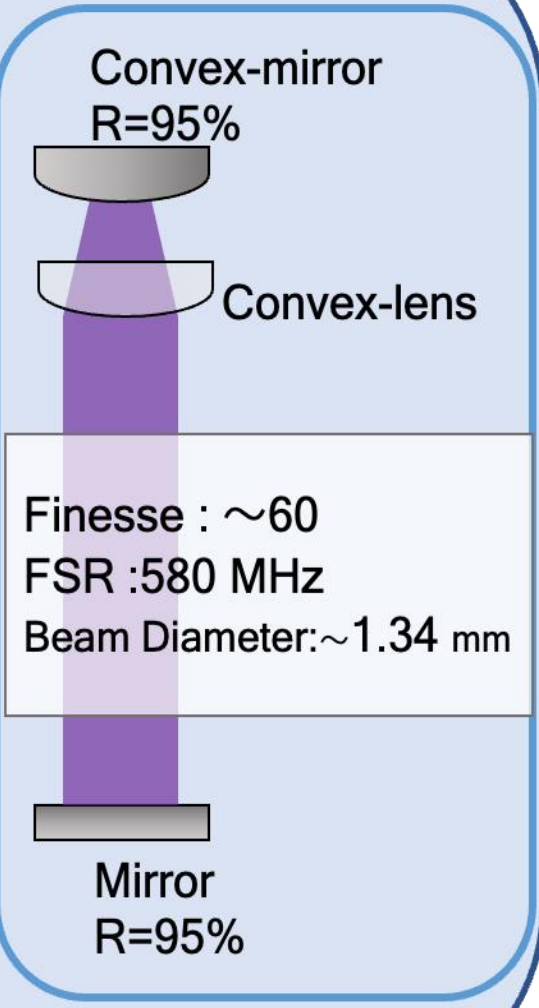
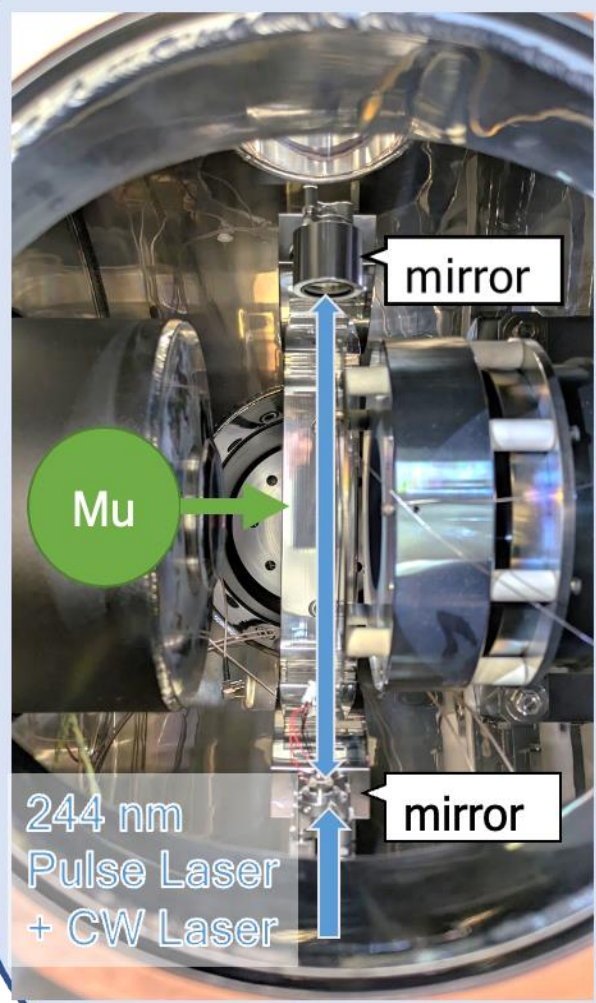
@ J-PARC MLF S2 line



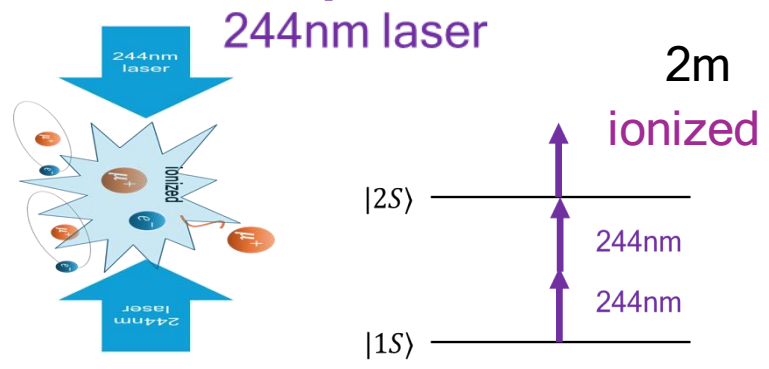
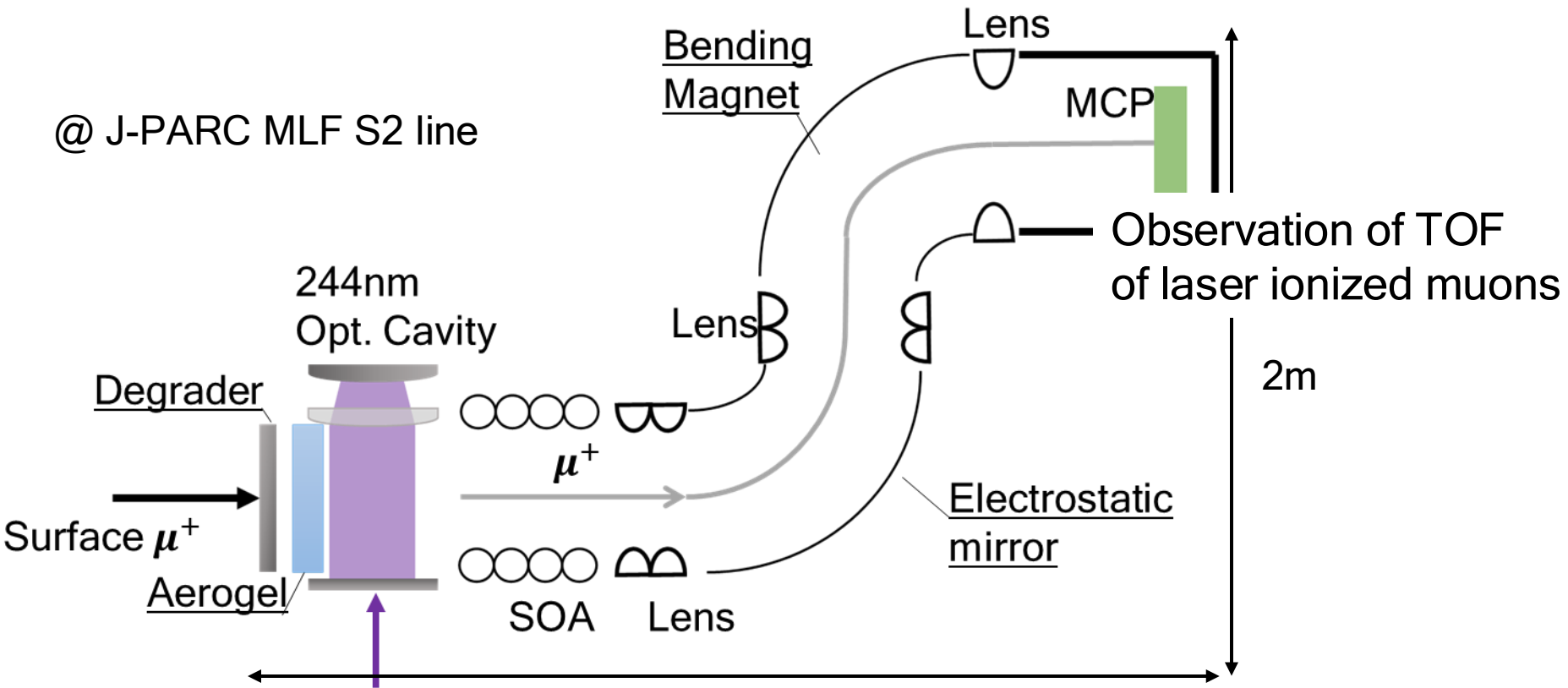
@ J-PARC MLF S2 line



From above

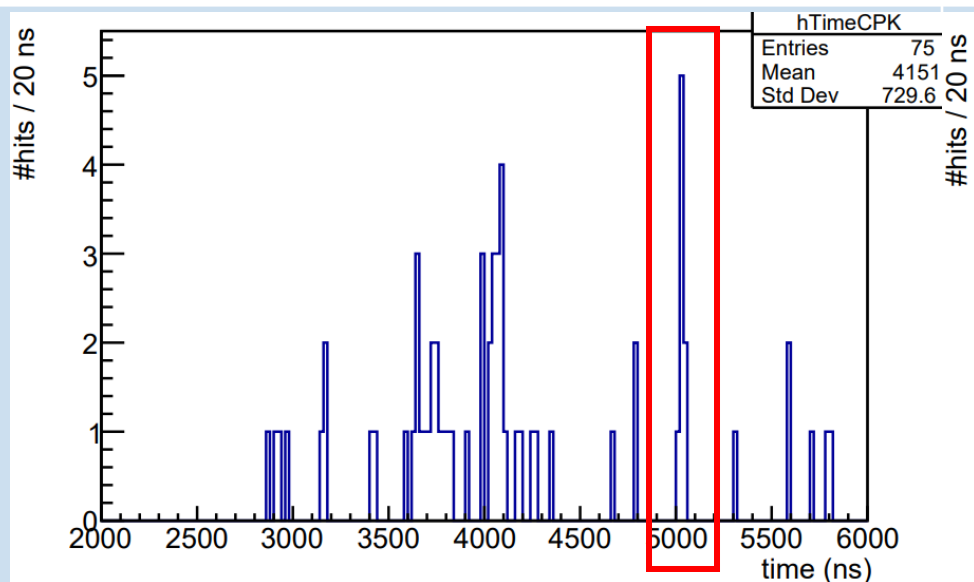


@ J-PARC MLF S2 line

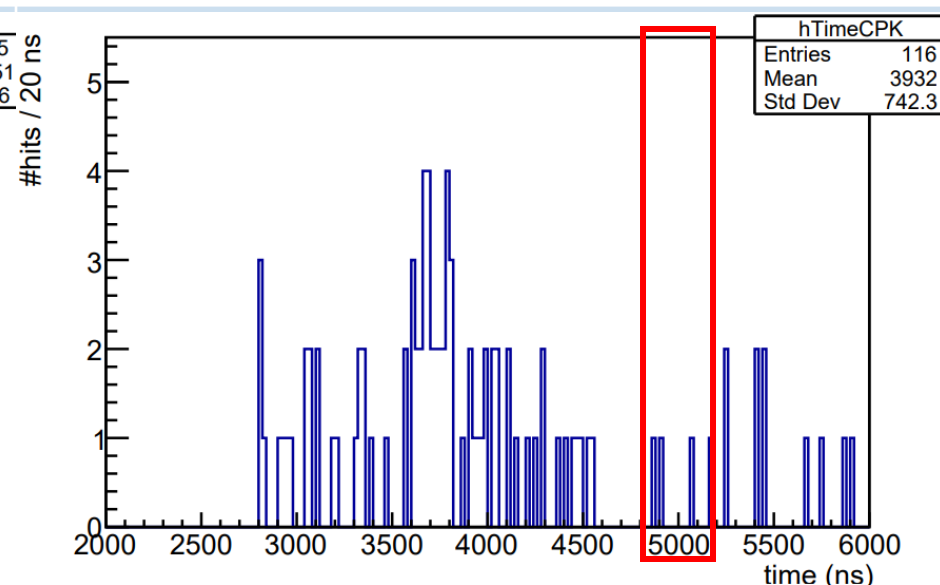


レーザーイオン化されたミュオンのTOFを観測
(赤枠内がミュオンのイオン化信号のTOF相当)

レーザーあり

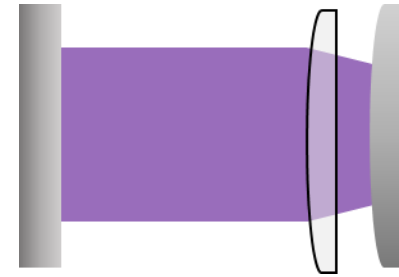


レーザーなし(background)



- 共振器内二光子励起信号の観測に成功!!(2024. Jun.)
 - しかし、共振器の劣化が速く、励起スペクトルは得られなかった。
 - 共振器の透過パルス高が数分で低下
 - 共振器のフィネスが低下し回復しない
- ⇒真空環境での紫外領域の共振器ミラーの劣化.

- SEM画像 (2024. Jun. に劣化した凸ミラー)
- 最大Intracavity強度 0.23 J/cm^2



凸面



平面

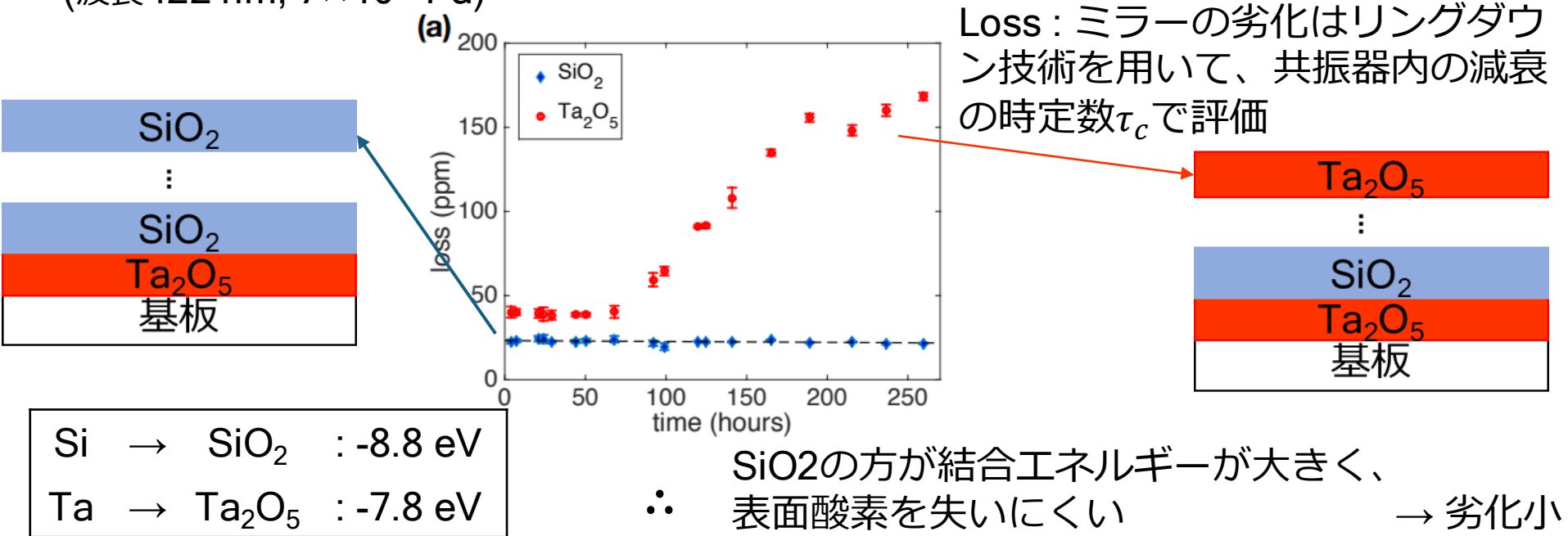
1mm程度(レーザー径くらい)の影が確認できる

D. Gangloff *et al.*, Opt. Express 23, 18014(2015)

- ミラーは温度が高いほど速く劣化
- 酸素パージによって回復

- 誘電体多層膜ミラー($\text{SiO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$)の最外層を Ta_2O_5 , SiO_2 で比較

(波長422 nm, 7×10^{-5} Pa)



Si → SiO₂ : -8.8 eV

Ta → Ta₂O₅ : -7.8 eV

∴

SiO₂の方が結合エネルギーが大きく、
表面酸素を失いにくい

→ 劣化小

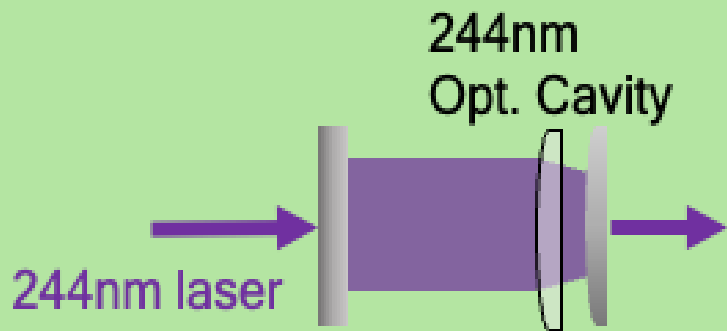
⇒ 表面層にSiO₂層を生成することで劣化防止が可能

∴ 最表面をSiO₂層にすることで劣化の度合いが低下.

問題点(2024.

Jun.)

- 共振器内のレンズのARコートがSiO₂でない.
- ミラーの最外層はSiO₂.
- コーティング方法が電子ビーム蒸着(大気中ではパルスのダメージ耐性高蒸着方法に起因して膜と膜の間に隙間 → 真空中で性能低下?)



対処方法(2024. Sep.)

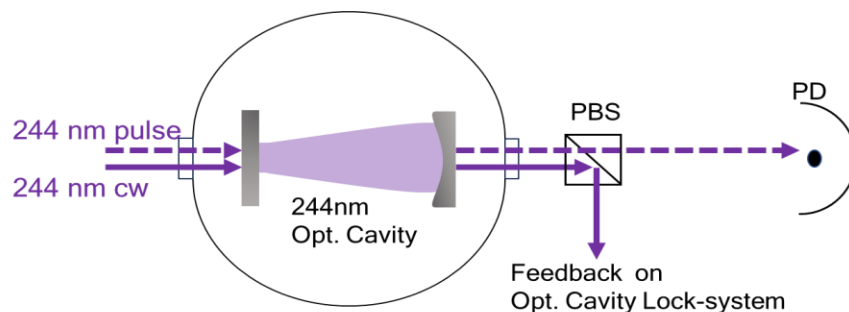
- レンズ不使用 → 凹ミラー共振器
- ミラーをIAD蒸着
(IAD - イオンアシスト蒸着 :
真空中で密着した膜の蒸着が可能)



Scheme

- 244 nm CWで共振器をロック(安定化)
- 244 nm パルス光(共振器に共鳴)入射
- 真空中での透過パルスのピーク高を計測 (1時間)

@ J-PARC MLF S2 line



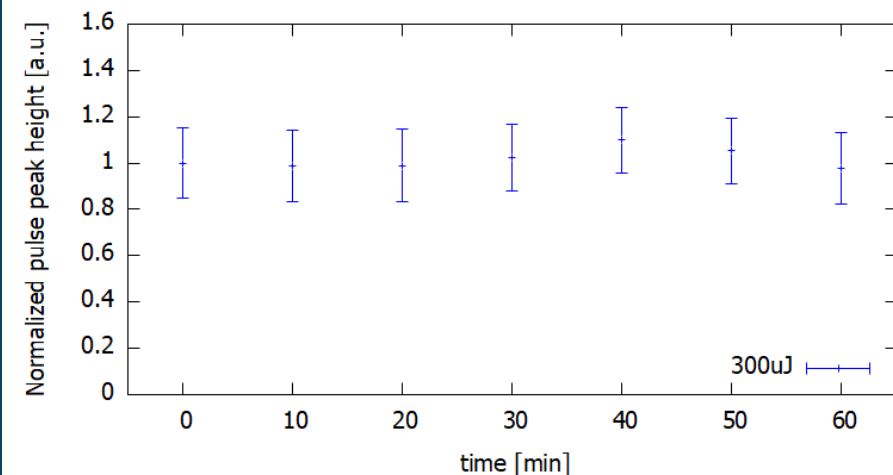
真空チャンバー

真空度 : $\sim 10^{-4}$ Pa

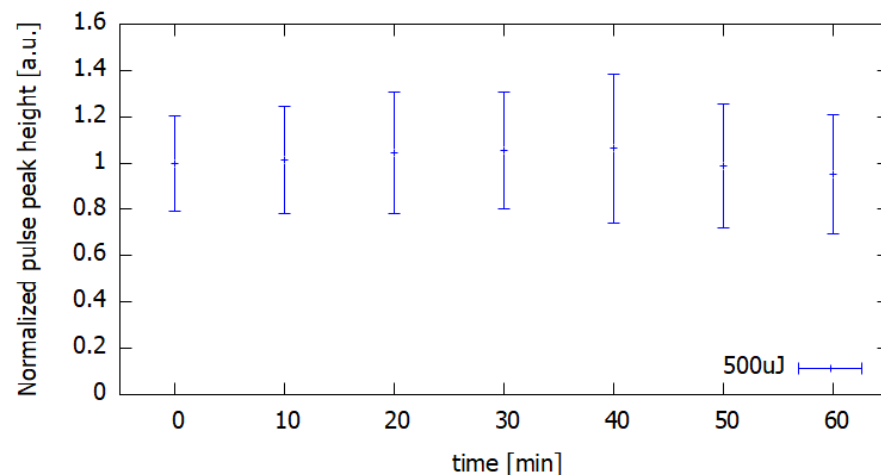
凹ミラー共振器

- Finesse : ~ 60
- FSR : 560 MHz
- Beam waist radius : 296 μm

Input power 0.3 mJ



Input power 0.5 mJ



Intracavity強度 0.35 J/cm^2
(6月実験 : 0.23 J/cm^2)

- 真空中($\sim 10^{-4} \text{ Pa}$)で共振器の劣化は確認されなかった。

⇒IADでコーティングされたミラーでは劣化しない。

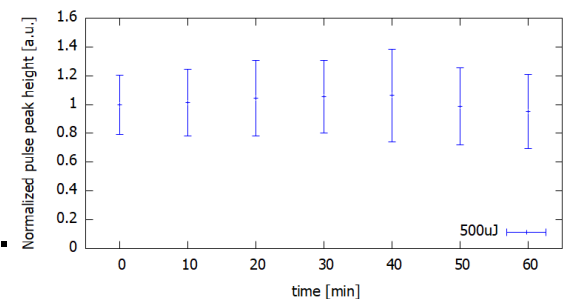
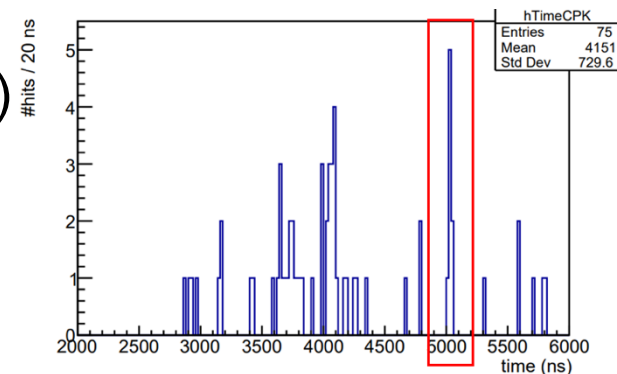
凸ミラー共振器のミラーもIADを用いることで安定して使える可能性あり。

244 nm大ビーム径光共振器

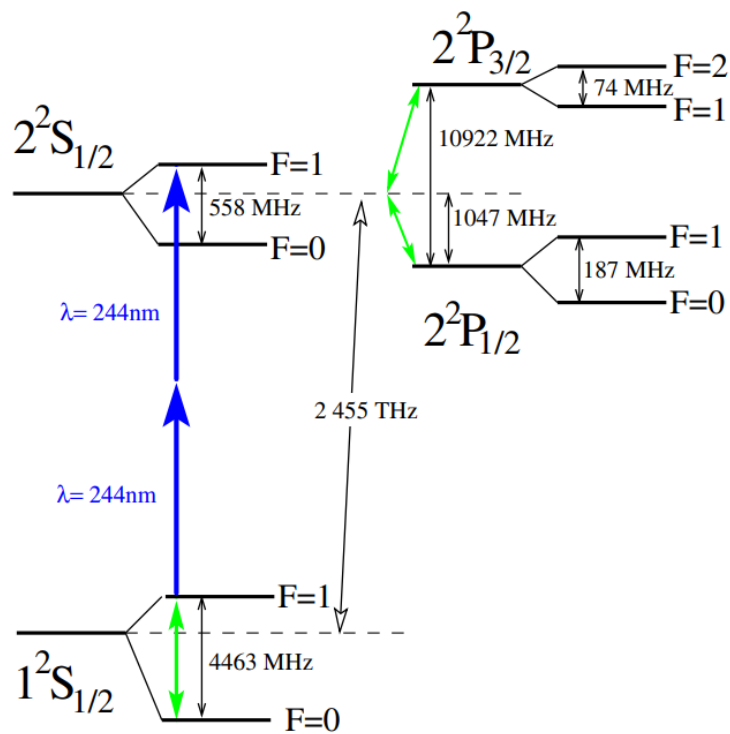
➤ 残留ドップラーシフトのキャンセル

⇒ 共振器内二光子励起信号の観測に成功!! (2024.Jun.)

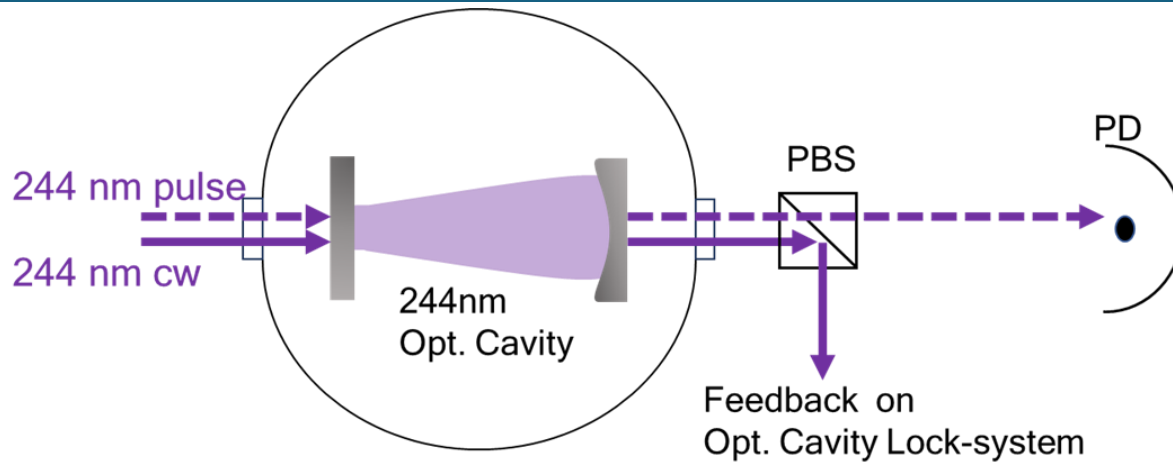
- 真空環境での紫外線光学の劣化(先行研究)
 - 表面酸素枯渇
- コーティング方法を電子ビーム蒸着 → IAD
- IADのミラーで劣化のない共振器を作成 (2024.Sep.)
- (2025. Apr.-) 不確かさ1MHzの周波数測定を目指す。



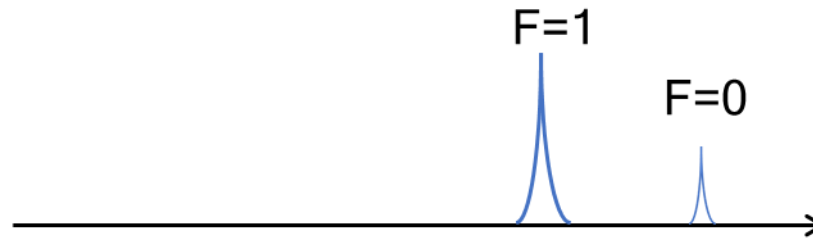
Back up



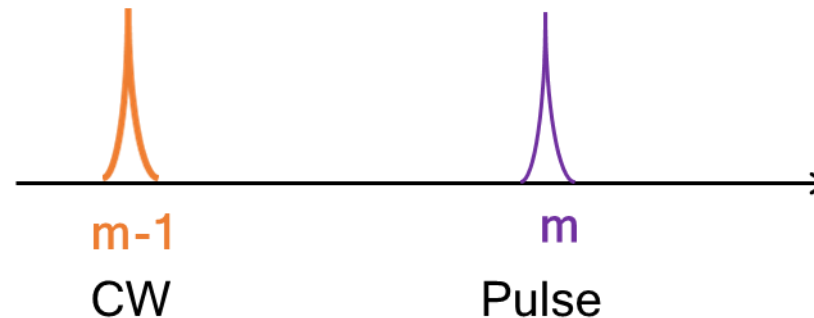
	RAL(1999)	2025A Prospects
	Uncertainty	Expected Uncertainty
Statistics	9.1 MHz	✓ 0.5 MHz > × 300 signal
Res. Doppler	3.4MHz	Opt. cavity (this presentation)
Freq. calibration	0.84 MHz	} ✓ 0.05 MHz Opt. comb
Freq. lock stability	0.5 MHz	
Line shape calc	1.2 MHz	x 1/2 (TBC)
Total	9.8 MHz	~1 MHz



Mu resonance



Laser freq.
mode num. #



CWとMuは非共鳴
PulseとMuは共鳴

- 2nd-order Doppler shift

$$\omega' = \omega_0 \underbrace{\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}}_{\rightarrow} + \omega_0 \underbrace{\sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}}_{\leftarrow} = 2\omega_0 [1 - \beta^2]^{-\frac{1}{2}} \sim 2\omega_0 \left[1 + \frac{1}{2} \beta^2 \right]$$

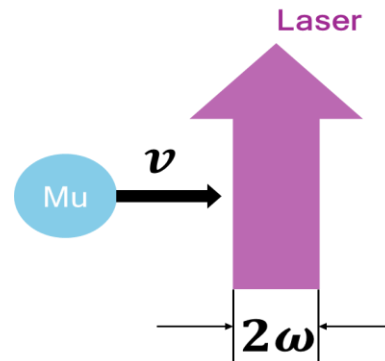


$$\Delta\nu_{2nd.Dop.} \sim \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} f_{1s-2s} \propto v^2$$

- Transit-time broadening

$$\Delta f_{tb} = \frac{v}{2\omega} \propto v$$

ω : beam radius



$$\tilde{v} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}}$$

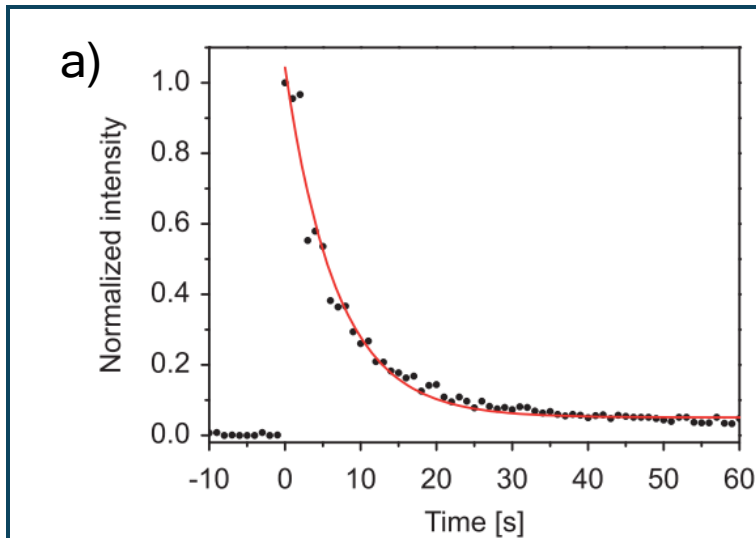
T : temperature
 m : mass

Cool down Mu. (Decelerate Mu)

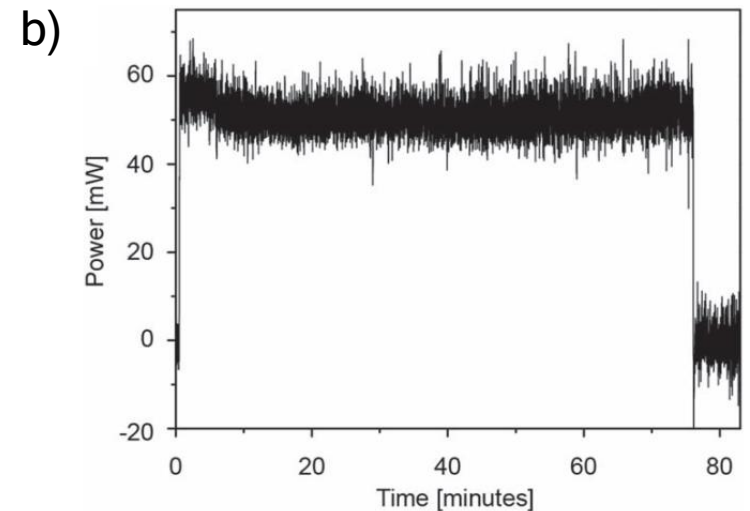
C. Brand *et al.*, Phys. Scr. 98, 085521(2023)

- 最表面にSiO₂を蒸着した2組のミラーの共振器を比較(波長266nm)
(製法: イオンビーム蒸着, 製造会社: 違う(会社名記載なし))

a) 1mbar
b) 0.1mbar



典型的な劣化を確認



劣化しない

共振器内4.4W・75minのロック可能

⇒表面はどちらもSiO₂層のため、材料以外の理由があるはず。

コーティング表面のマイクロ化学環境に起因しているのでは。

(Si-OH基, Si結合の歪み・欠陥等)

