



CANDLES実験に向けた ^{48}Ca 高効率濃縮のためのラビ振動原理検証

大阪大学
谷川秀憲

Candles

2026/03/13

第二回若手研究会

共同研究者: 嶋達志, 三島賢二 (RCNP)

目次

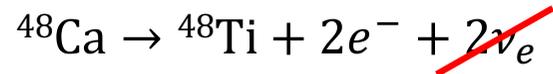
1. イントロダクション
2. 実験手法の検討
3. 実験に向けた準備
4. まとめと展望

目次

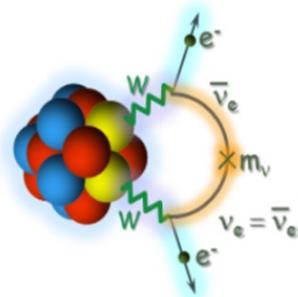
1. イントロダクション
2. 実験手法の検討
3. 実験に向けた準備
4. まとめと展望

CANDLES実験

✦ CaF₂内の⁴⁸Caを用いた0νββ崩壊探索



(崩壊Q値: 4.27 MeV, 自然存在比: 0.187%)



~0νββ崩壊~

(ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊)



~CANDLES III CaF₂結晶~

✦ 現状のCANDLES III検出器

CaF₂結晶 : 305 kg

⁴⁸Ca 存在比 : 0.187%

⁴⁸Ca : 350 g

✦ 次世代検出器

CaF₂結晶 : 2 tons~

⁴⁸Ca 存在比: 80%~

⁴⁸Ca : 数 tons

濃縮率を上げることが課題

(同位体濃縮がCANDLESでは不可欠.)

^{48}Ca 同位体濃縮

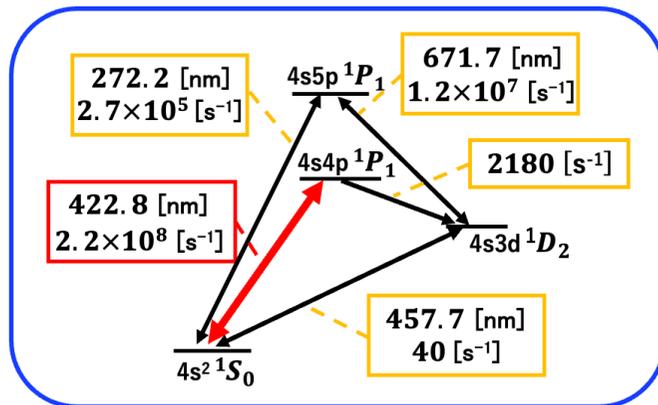
✦ 常温で固体 & 揮発性化合物なし

➡ 気体拡散・遠心分離 ✕

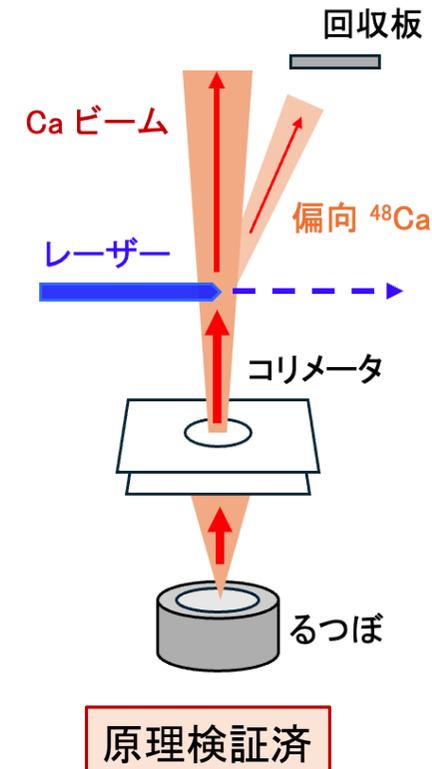
✦ 同位体シフト(同位体間で共鳴波長の差)が存在

例) 422.8 nm ($^1S_0 \rightarrow ^1P_1$) 遷移

安定同位体において隣接する ^{44}Ca と ^{48}Ca に 0.5 pmの差が存在 ➡ ^{48}Ca のみ選択的に分離可能.
レーザー濃縮法(偏向法) ○

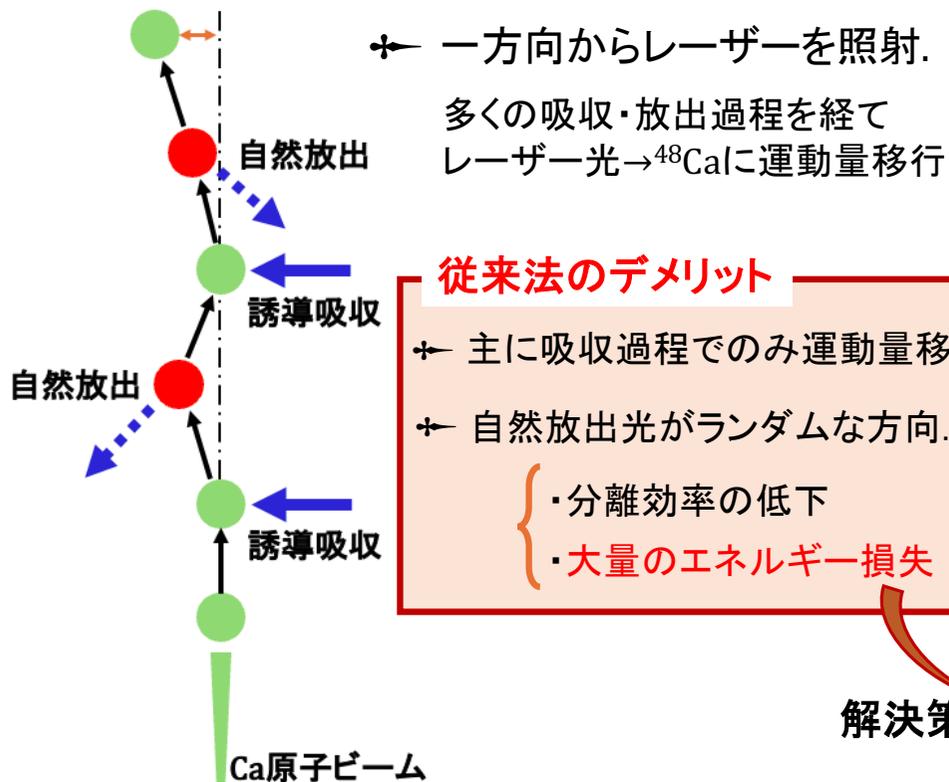


~Caレーザー偏向法概略図~



従来のレーザー偏向法における課題

従来のレーザー偏向法

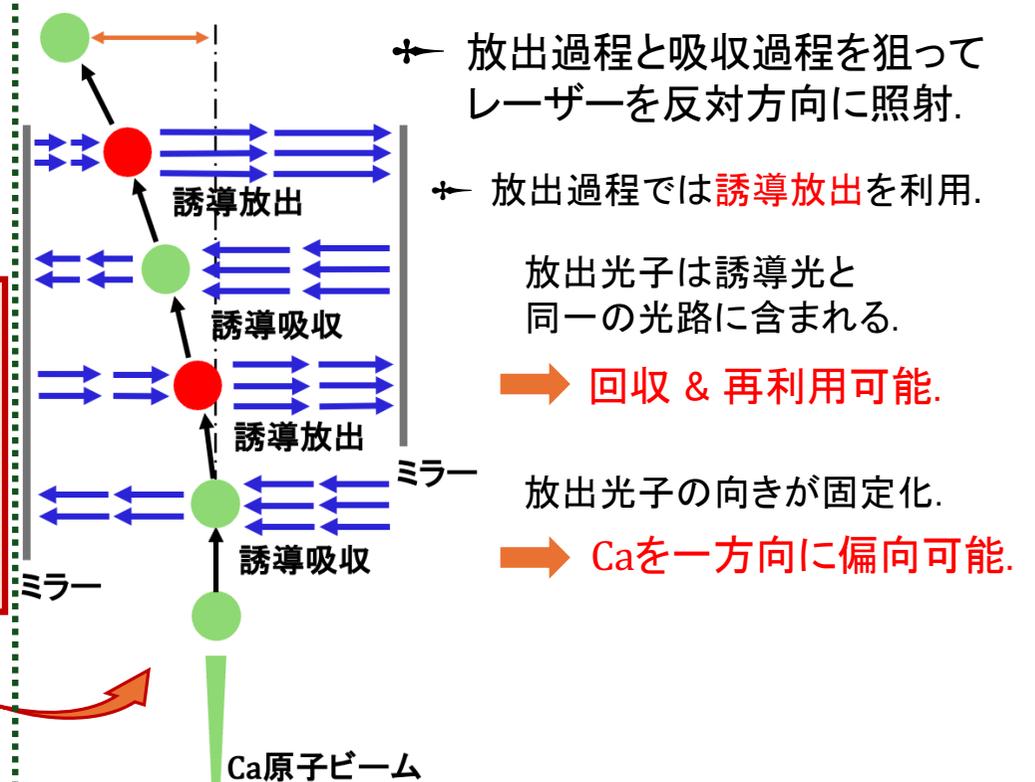


従来法のデメリット

- ✦ 主に吸収過程でのみ運動量移行.
- ✦ 自然放出光がランダムな方向.
 - ・分離効率の低下
 - ・大量のエネルギー損失

解決策

考案されている新手法



誘導放出の制御

✦ 二準位原子に共鳴付近のコヒーレントな単色レーザーを照射した際、

+ 相互作用ハミルトニアン

$$\hat{H}_{int} = -\mu_{mn} \cdot E(t)$$

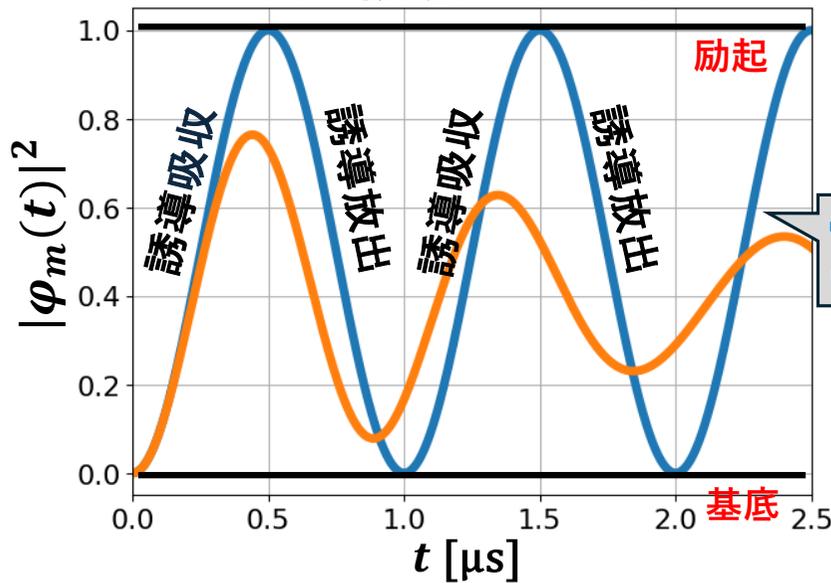
二準位系における励起確率:

$$|\varphi_m(t)|^2 = \frac{\Omega^2}{\delta^2 + \Omega^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\sqrt{\delta^2 + \Omega^2}}{2} t\right)$$

共鳴周波数 ω_{mn} からのズレ

(ラビ振動数: $\Omega \equiv \frac{\mu_{mn} \cdot E_0}{\hbar}$, 離調: $\delta \equiv \omega - \omega_{mn}$)

～ラビ振動($\Omega=1\text{MHz}$)～



✦ 励起確率が時間の周期性をもって変動する現象. (ラビ振動)

✦ $\delta = 0$ の理想的な場合,

$$|\varphi_m(t)|^2 = \sin^2\left(\frac{\Omega}{2} t\right)$$

... 誘導吸収・誘導放出が制御可能.

✦ ドップラーシフトの影響により有限の離調が存在.

➡ デコヒーレンスが発生!!!

研究目的

✦ ラビ振動による誘導放出を用いた ^{48}Ca の同位体分離の可否を議論する前に,
ドップラーシフト・自然放出等がコヒーレンスに与える影響を切り分けて理解することが重要.

✦ 本研究ではCa原子ビームを用いたラビ振動 (量子力学的な効果) の観測を目的とする.

しかし, ^{48}Ca は自然存在比が低く (0.187%)、観測が困難.

➡ モデル系として自然存在比の高い ^{40}Ca (96.9%)を用いてラビ振動の観測を目指す.

^{40}Ca と ^{48}Ca は共鳴波長のみが異なるため, ^{40}Ca で確立した制御技術は ^{48}Ca にそのまま移植可能.

本研究における取り組み

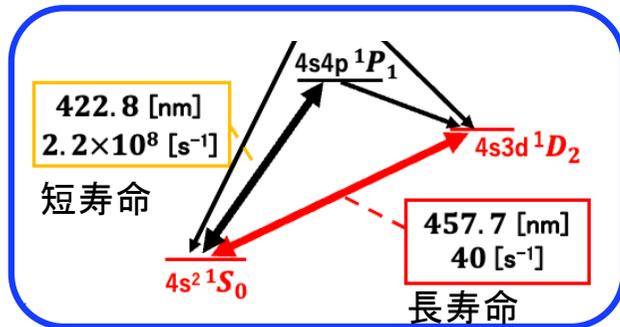
- ・Ca原子ビームを用いたラビ振動観測手法の提案 & 数値計算による検討.
- ・ラビ振動の観測に向けてCa原子ビーム作製 & ビームの広がりを評価.

目次

1. イントロダクション
2. 実験手法の検討
3. 実験に向けた準備
4. まとめと展望

ラビ振動測定手法

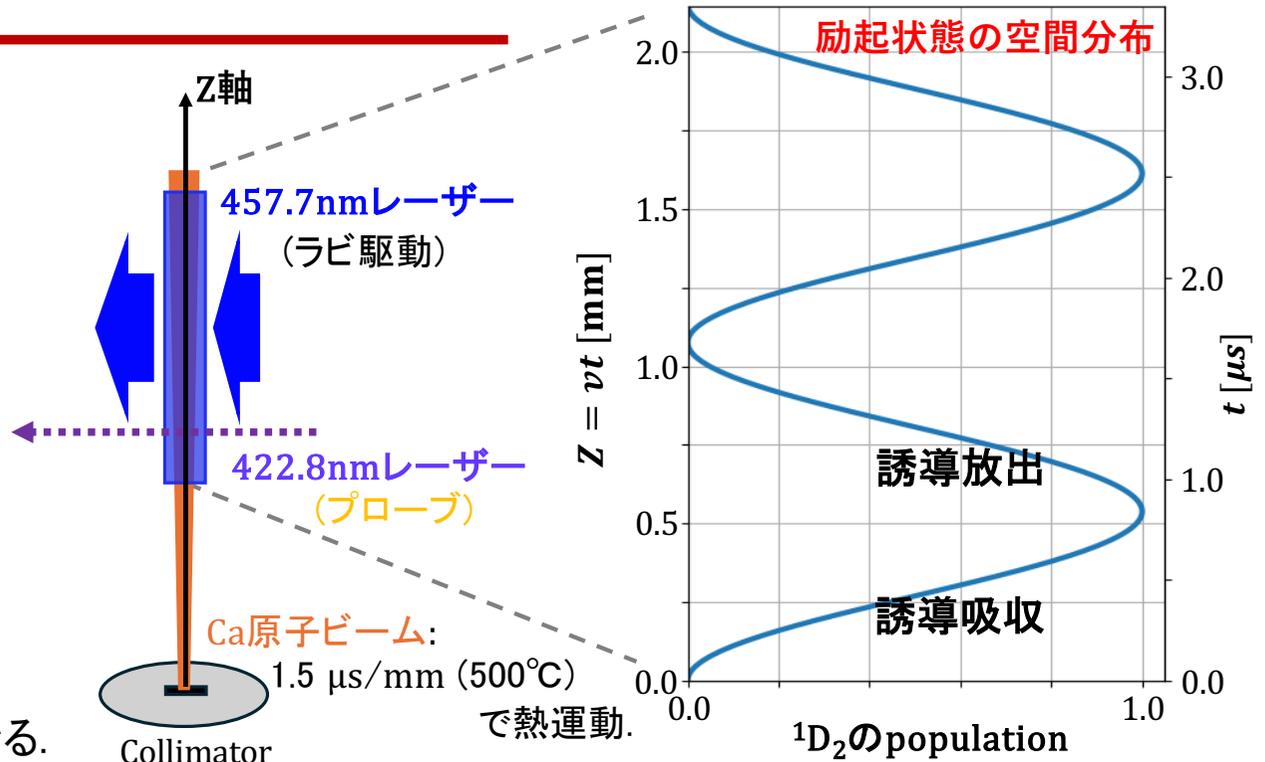
✦ ラビ振動を起こす二準位の選択



✦ 457.7 nm ($^1S_0 \rightarrow ^1D_2$) 遷移:
 自然放出率 $\Gamma \approx 40 \text{ s}^{-1}$
 寿命: $\tau \approx 25 \text{ msec}$: (長寿命)

➡ 自然放出による減衰が無視できる。
 ラビ振動観測に適した遷移。
 (採用!)

ラビ振動の効果



✦ ラビ振動数: 約600 kHz(例)では2mmの相互作用域で

➡ 空間的に遷移状態が分かれるはず

✦ 基底状態のpopulationを短寿命の遷移でプローブ

➡ プローブ光の照射高さにより蛍光強度が変化するはず.

現実的な要因を考慮した数値計算に向けて

✦ 空間分布を崩し得る要因

- ① 寿命: 25msec での自然放出による脱励起
- ② ガウシアンビームによるラビ振動数空間分布の非一様性
- ③ ドップラーシフトがもたらす有限の離調 δ によるデコヒーレンス
- ④ Ca蒸気の速度ばらつき (457 nmとの相互作用時間が原子ごとに異なる)

✦ これらの要因を考慮して \longrightarrow 観測可能な空間分布が残るかどうか**数値計算にて検証**を行う。

数値計算上の設定値 (現実で再現可能)

- ・レーザーパワーP: 180 mW
- ・ $1/e^2$ 直径(長辺): 1.5 mm = $2w_z$
- ・ $1/e^2$ 直径(短辺): 0.5 mm = $2w_y$
- ・Ca原子ビームの最大発散角: 3.5 mrad

レーザー中心におけるラビ振動数

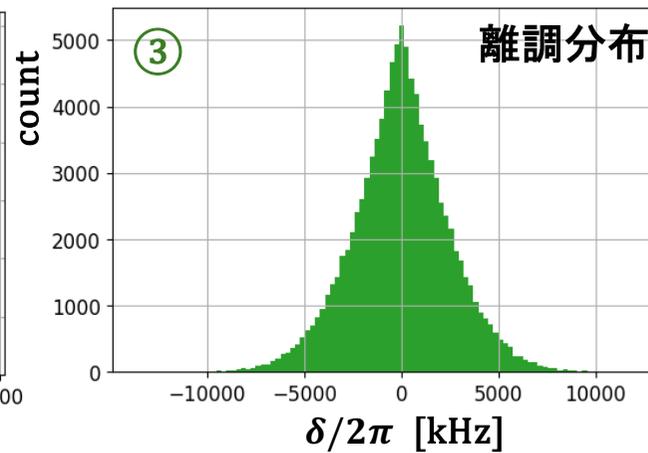
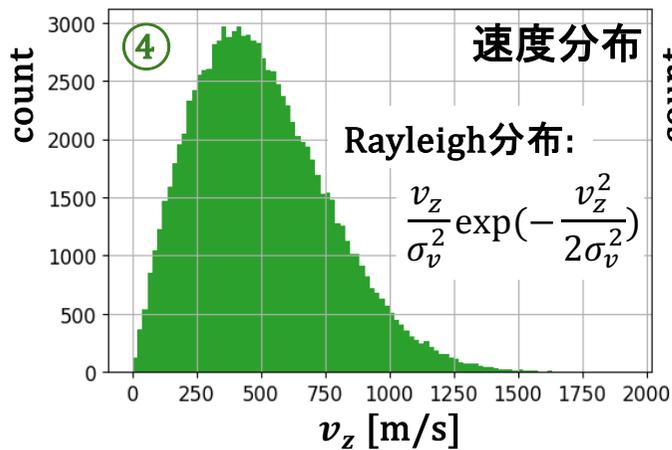
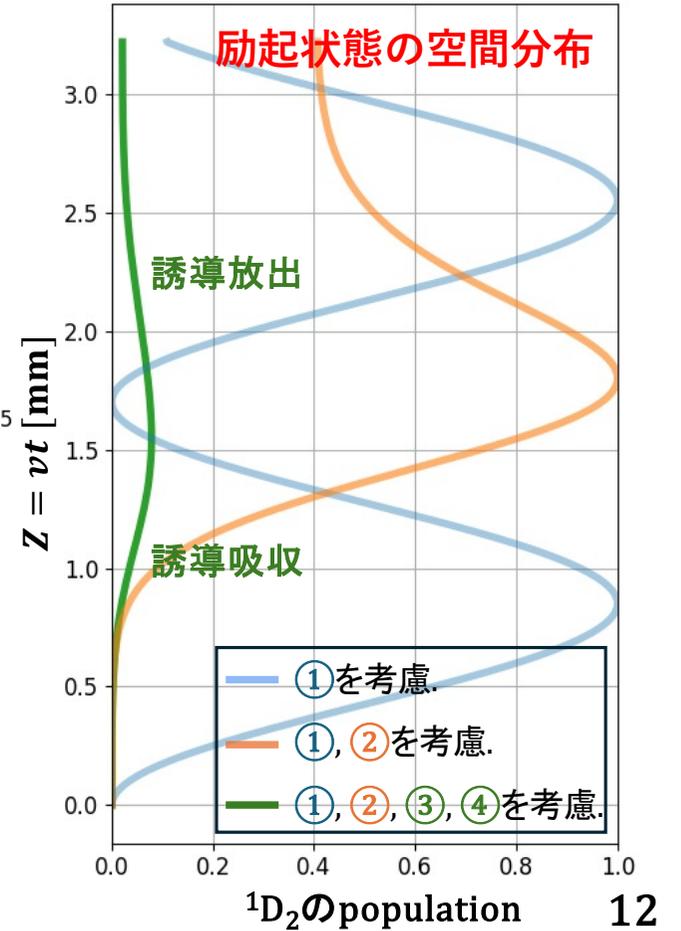
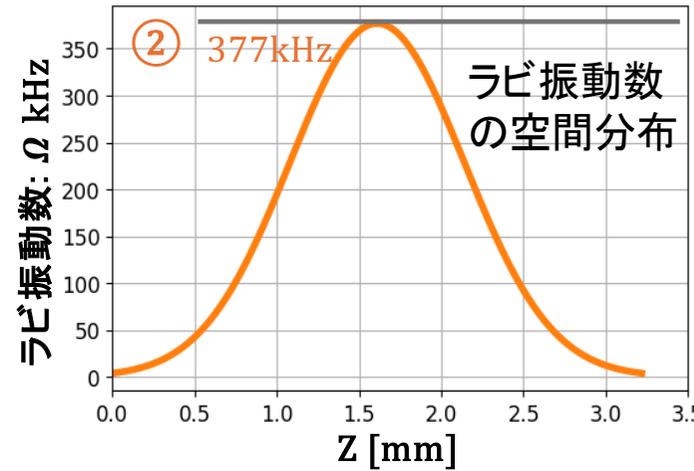
$$\Omega_0 = \frac{\mu_{mn}}{\hbar} \sqrt{\frac{4P}{\pi c \epsilon_0 w_y w_z}} \text{ [rad/s]} = \mathbf{377 \text{ kHz}}$$

(周期: 2.6 μ s)

($1/e^2$ 直径: レーザー強度が中心強度に対して $1/e^2$ に低下する位置の直径)

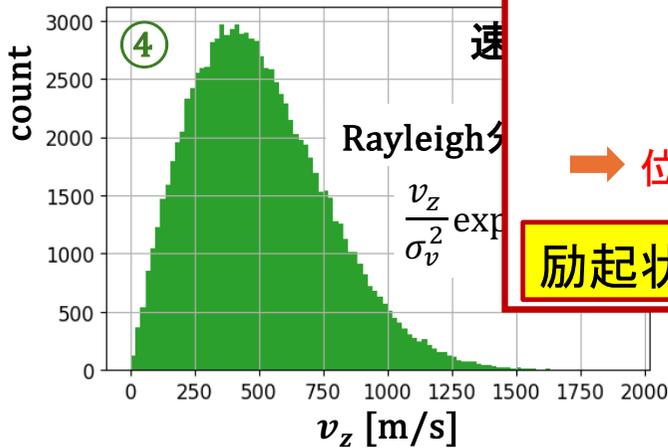
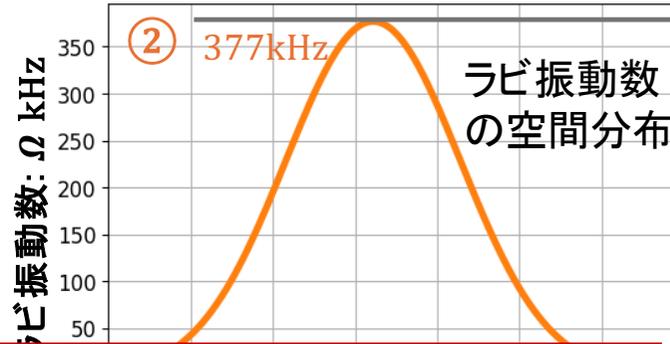
数値計算結果 (N=100,000のモンテカルロにより作成)

- ① 自然放出率: $\Gamma = 40 \text{ s}^{-1}$
- ② ラビ振動数のガウシアン分布
- ③ 原子ビームの最大発散角: 3.5 mrad
- ④ 鉛直速度のばらつき



数値計算結果 (N=100,000のモンテカルロにより作成)

- ① 自然放出率: $\Gamma = 40 \text{ s}^{-1}$
- ② ラビ振動数のガウシアン分布
- ③ 原子ビームの最大発散角: 3.5 mrad
- ④ 鉛直速度のばらつき

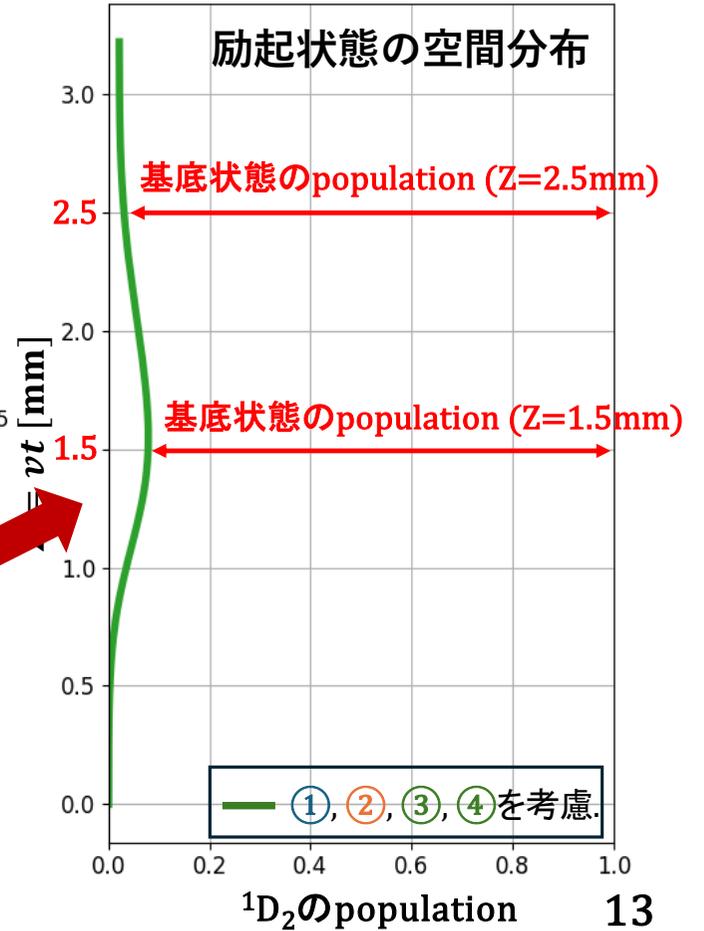


プローブ光の蛍光強度計算

$$P_{ratio} = \frac{P_{2.5 \text{ mm}}}{P_{1.5 \text{ mm}}} \approx 1.052$$

位置によって約5%の蛍光強度差

励起状態の空間分布が観測可能



目次

1. イントロダクション
2. 実験手法の検討
3. 実験に向けた準備
4. まとめと展望

Ca原子ビームの作製

✦ Ca蒸気の生成.

真空フランジ内で金属Caをるつぼで500°Cで加熱.

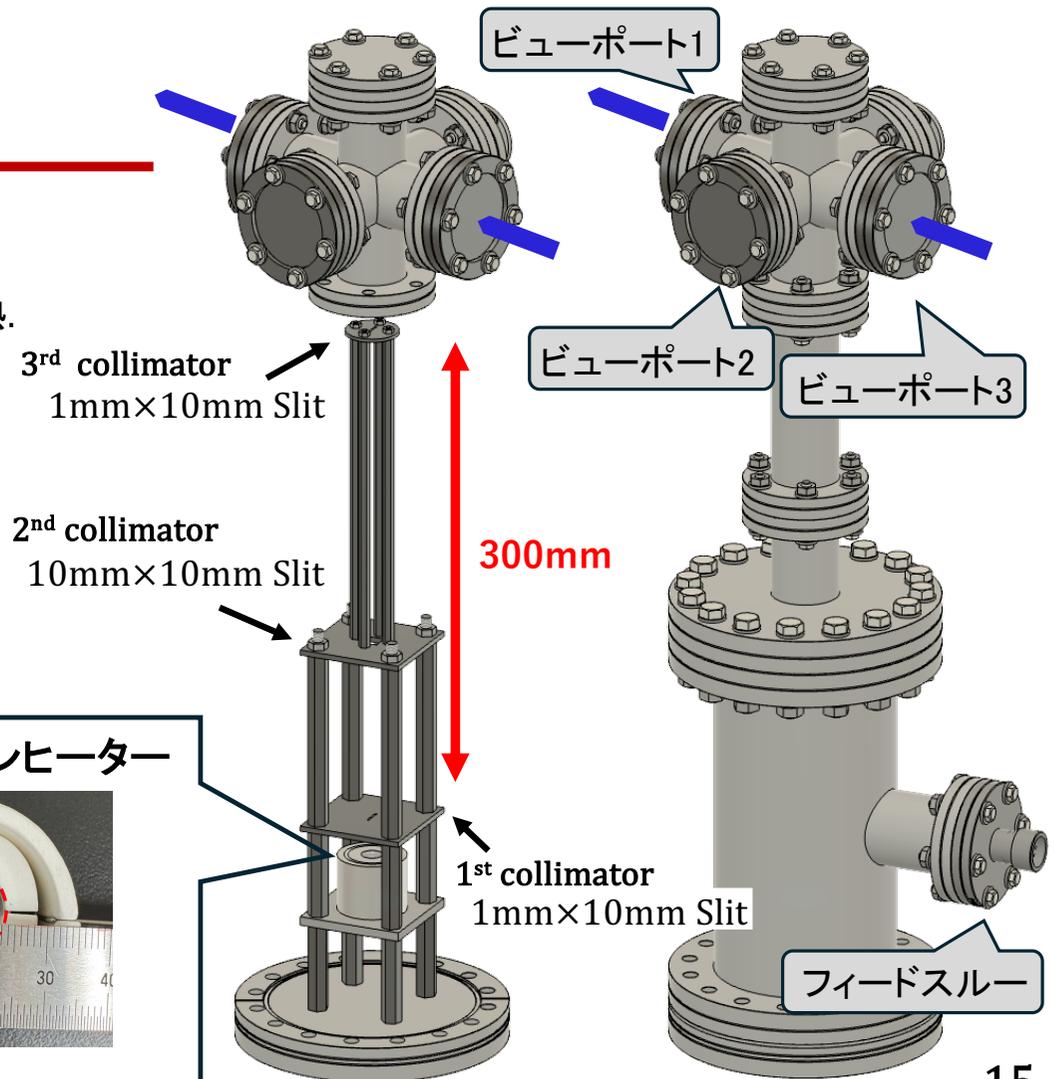
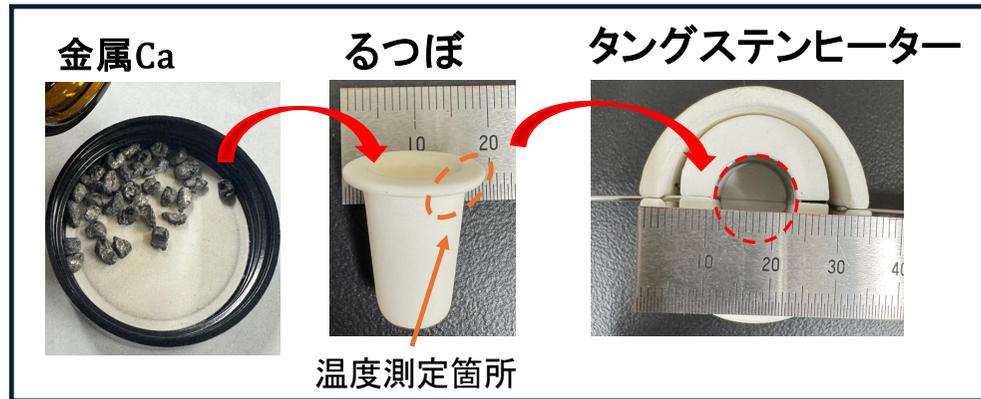
✦ コリメータの設計.

コリメータの(幾何学的な)最大発散角:

$$\theta_{Max} = \sin^{-1}(1/300) \approx 3.33 \text{ mrad}$$

(1mmスリット方向)

➡ 数値計算での要件を満たす.

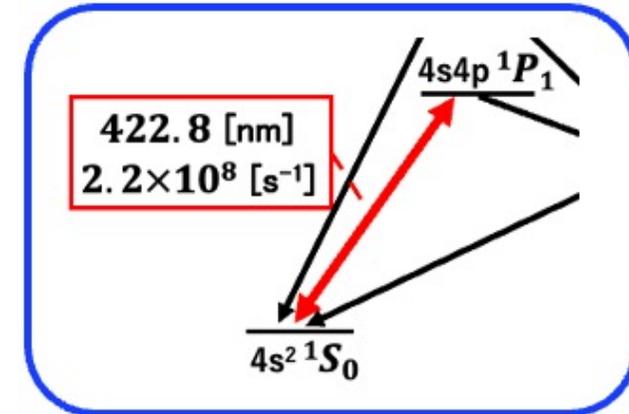
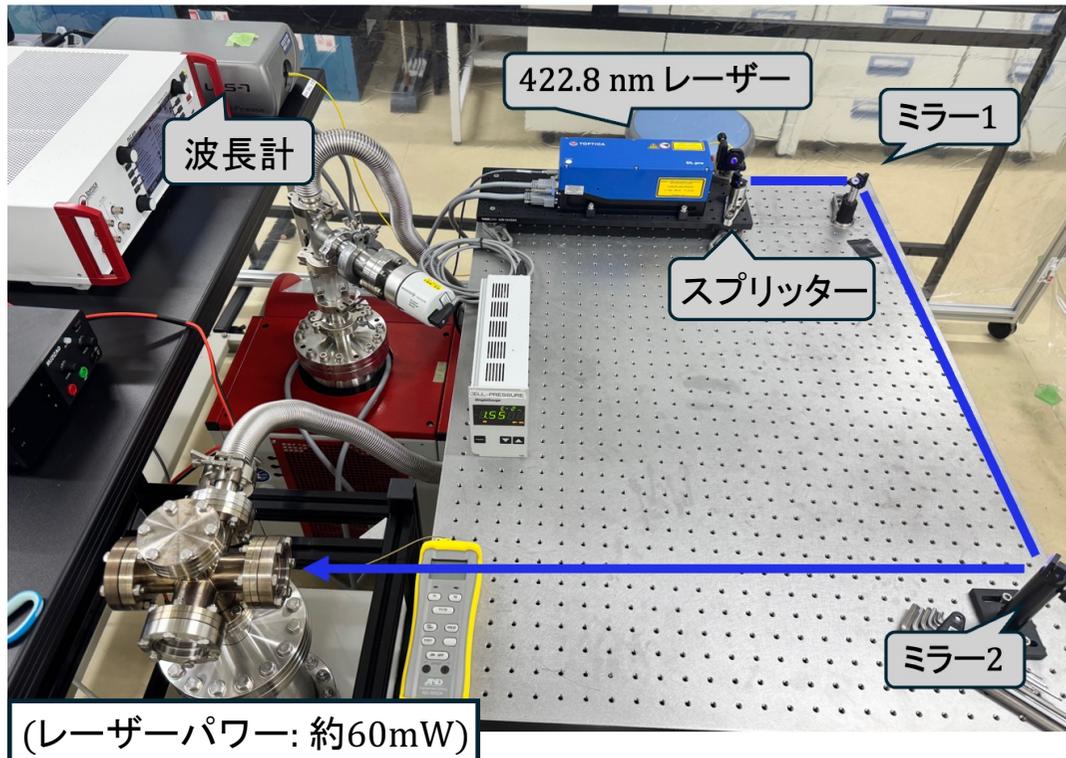


Caの蛍光観測

✦ Ca蛍光を観測を行った。

目的

- ・コリメータの機能性確認
- ・Ca蒸気の生成確認



蛍光観測を行う光学遷移

✦ 422.8 nm ($^1S_0 \rightarrow ^1P_1$) 遷移:
自然放出率 $\Gamma \approx 2.2 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$
寿命: $\tau \approx 4.5 \text{ nsec}$

- ➡ 自然放出光が可視光域.
(観測が比較的容易)
- ➡ 高い蛍光強度が期待できる.

観測されたCaの蛍光

観測時の条件

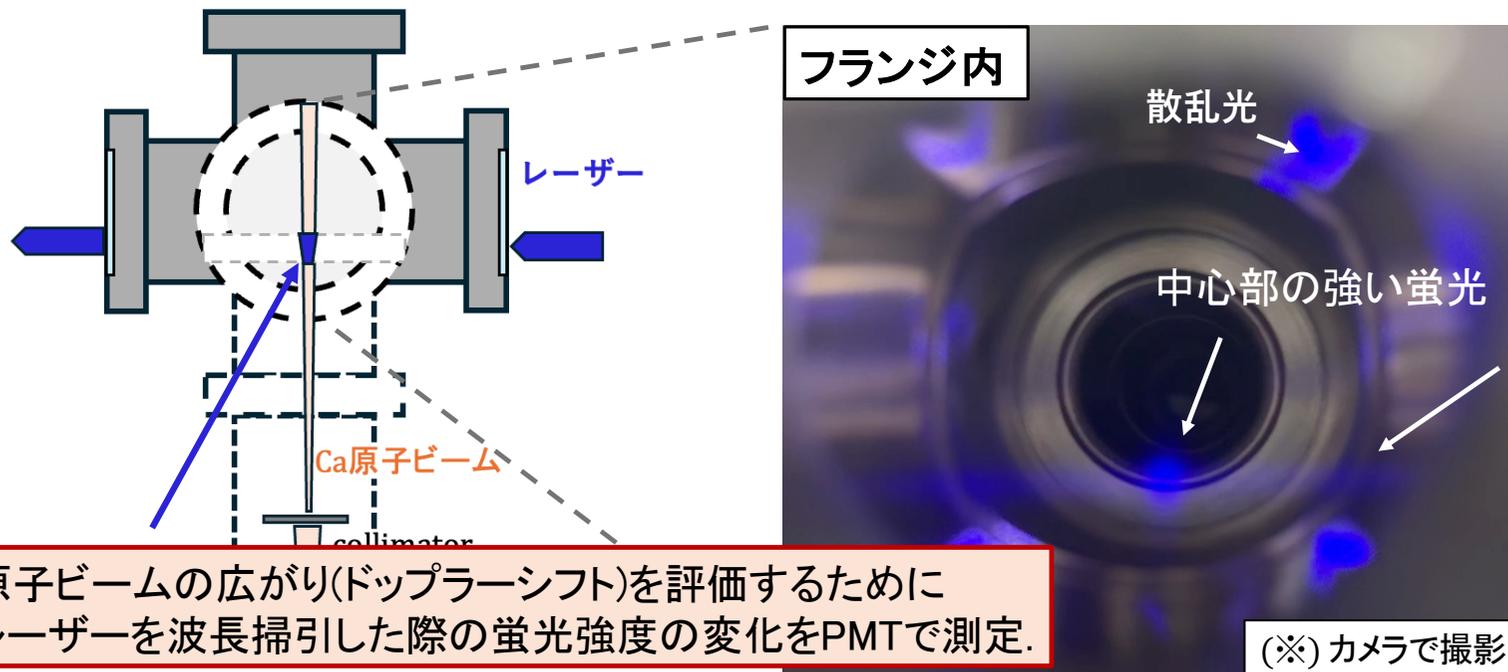
測定温度: 504°C, 真空度: 3.74×10^{-3} Pa,
レーザー波長: 422.79170 nm
($\sim^{40}\text{Ca}$ 共鳴吸収波長)

✦ コリメートされたフランジ内, 中心部に強い蛍光が観測できた.

Ca原子が存在する中心部に限定された蛍光観測が期待.

観測結果

周りにもCa蒸気の確認.
(ラビ振動観測には影響しない)



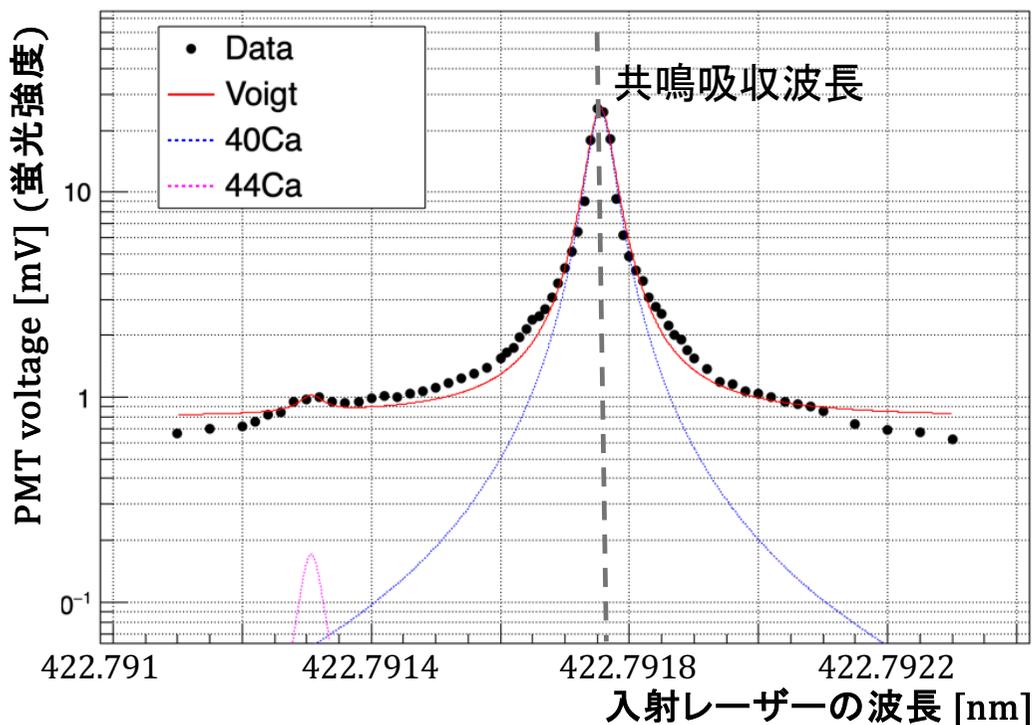
周りにCa蒸気が存在.

- ・アウトガスとの衝突
- ・Ca原子同士の衝突

蛍光強度の波長依存性

✦ フィッティング

Voigt関数: $V(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\nu')L(\nu - \nu') d\nu'$
(フォークト)
($G(\nu)$: Gaussian, $L(\nu)$: Lorentzian)



～フィッティング結果～

	フィッティング値	備考
Gaussian 幅	0.56 ± 0.18 MHz	ドップラーシフト
Lorentz 幅	89.188 ± 0.017 MHz	自然幅

✦ フィッティング結果から評価される
ドップラーシフト σ_{fit} : 0.56 ± 0.18 MHz.

✦ コリメートの幾何から計算される
ドップラーシフト σ_{colli} : 1.46 MHz.

$$\sigma_{fit} \approx \sigma_{colli}$$

➡ コリメートの機能が確認できた.

ラビ振動の観測に向けて、原子ビームの広がりが抑制されていることを確認.

まとめと展望

^{48}Ca の大量生産: CANDLES実験での大きい課題

✦ ラビ振動を利用した高効率なレーザー偏向法

(従来のレーザー偏向法におけるエネルギー損失を解決する手法)

本研究

- ・ラビ振動の観測方法を確立.

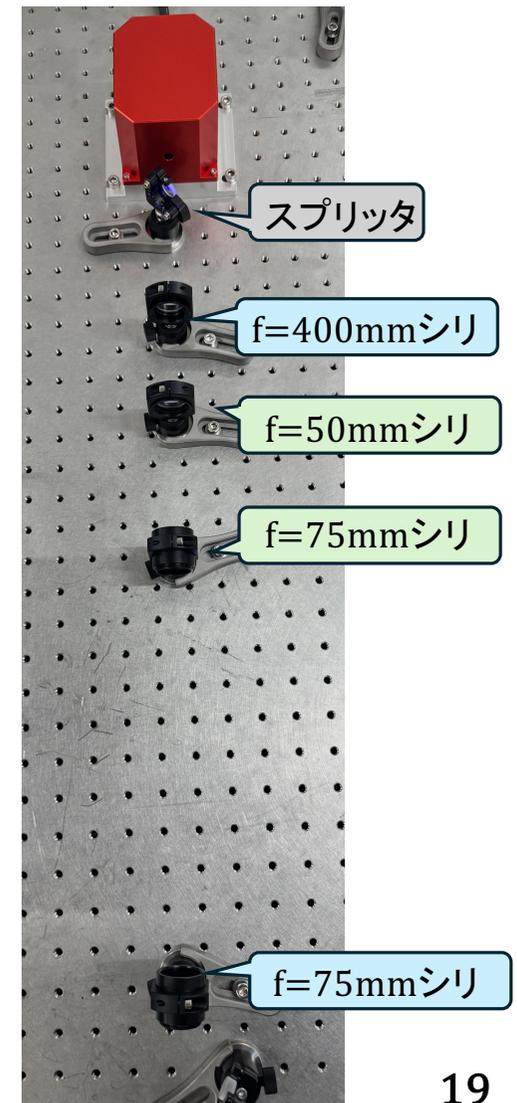
- ・Ca原子ビームの作製完了.

(・シリンダリカルレンズを用いてレーザーサイズの調整完了.)

展望

- ・本研究で検討した手法を用いてラビ振動の観測に移る予定.

➡ (・ラビ振動を用いた同位体分離の可否の議論に繋げる.)





Backup

4s² ¹S₀ → 4s3d ¹D₂ 禁制遷移

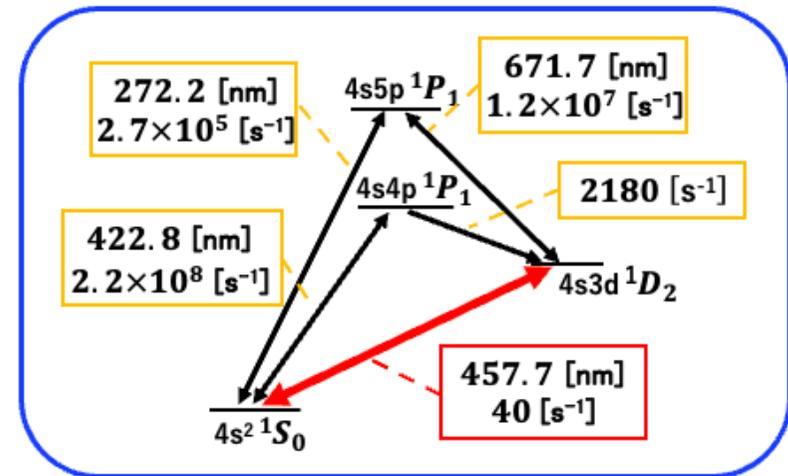
電気双極子 (E1) 遷移則

パリティ変化必須: 偶 ⇌ 奇

角運動量:

$\Delta L = \pm 1, \Delta J = 0, \pm 1$ ($J=0 \leftrightarrow J=0$ は禁止)

スピン多重度保存 (LS結合が強い場合)



✦ パリティが同じ

• ¹S₀: 偶 (4s² 配置は (-1)⁰: even parity)

• ¹D₂: 偶 (4s3d 配置も (-1)²: even parity)

✦ 角運動量

• ¹S₀: L=0, S=0, J=0

• ¹D₂: L=2, S=0, J=2

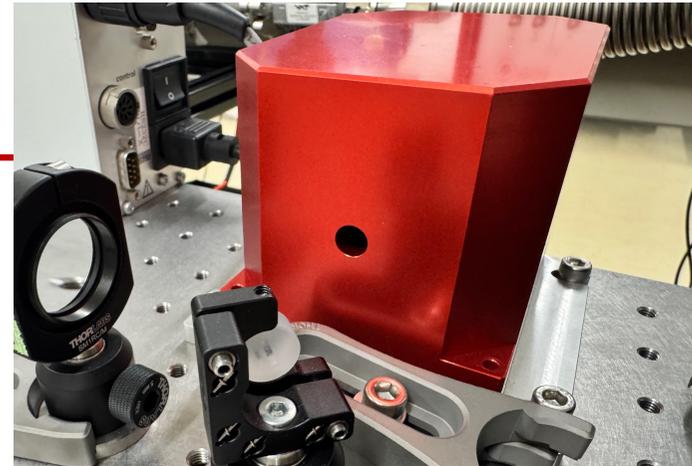
} $\Delta L = 2, \Delta J = 2$

S: 全スピン角運動量

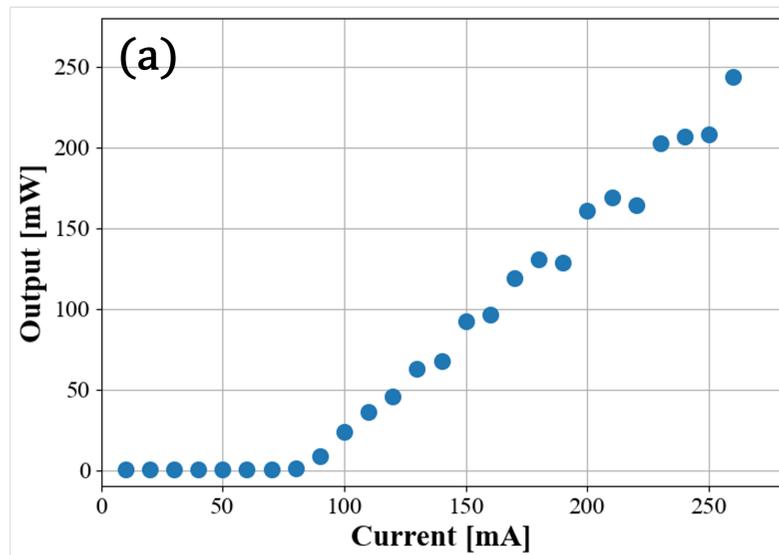
L: 全軌道角運動量

J: 全角運動量 (J=L+S)

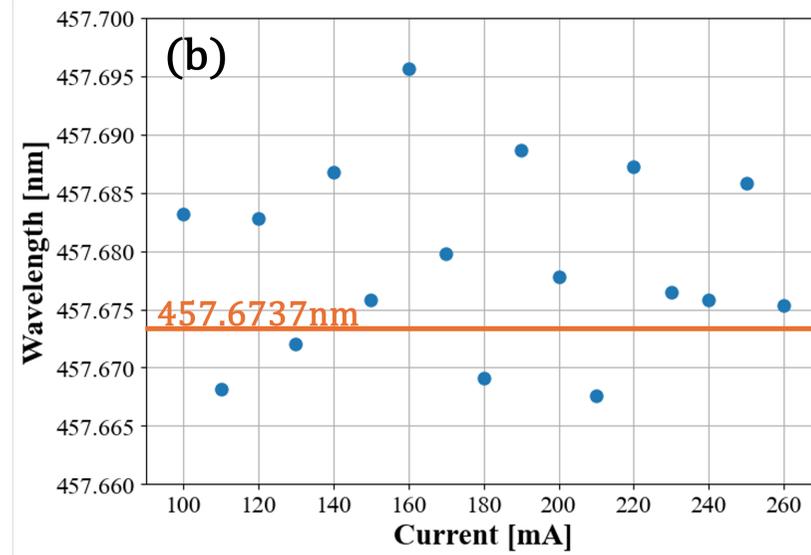
457.7 nmレーザー



出力

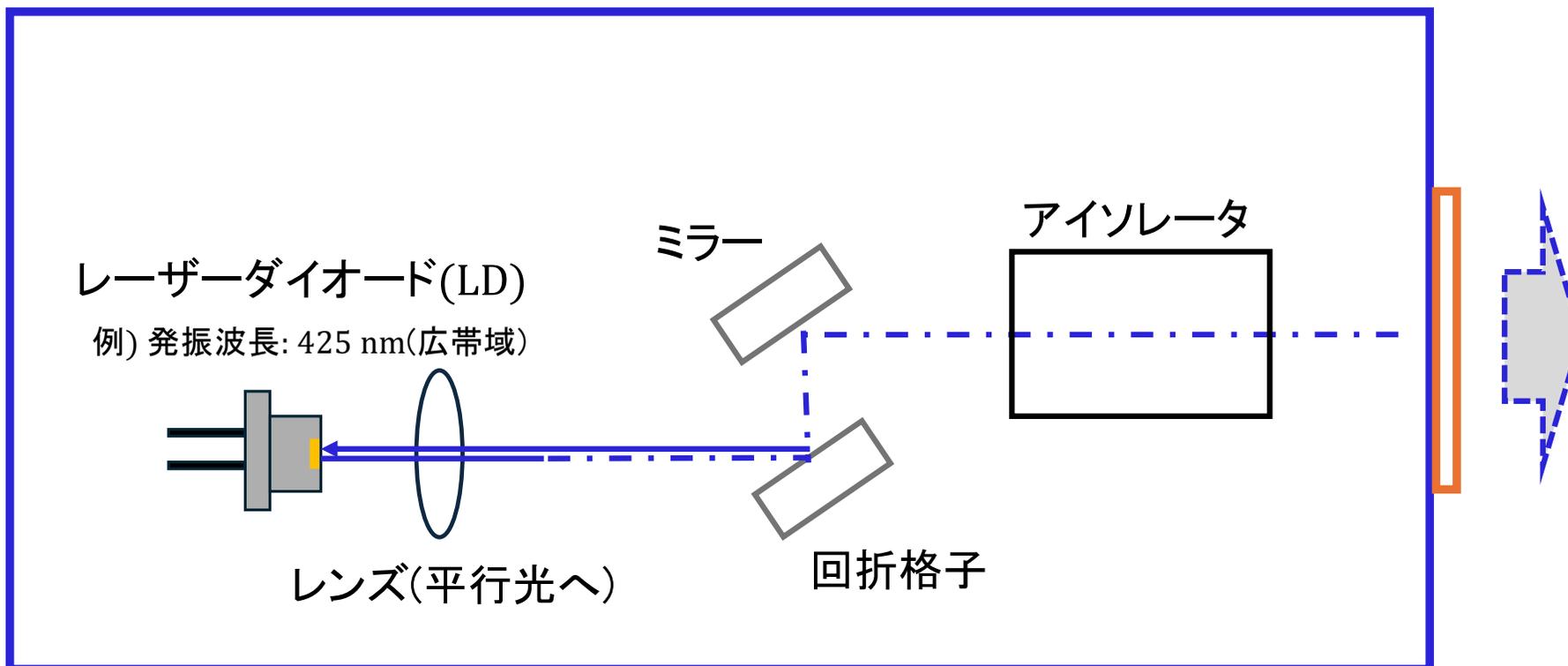


波長



外部共振器型半導体レーザー(ECDL)

✦ 回折格子にて分光し、特定波長のみLDへフィードバック.

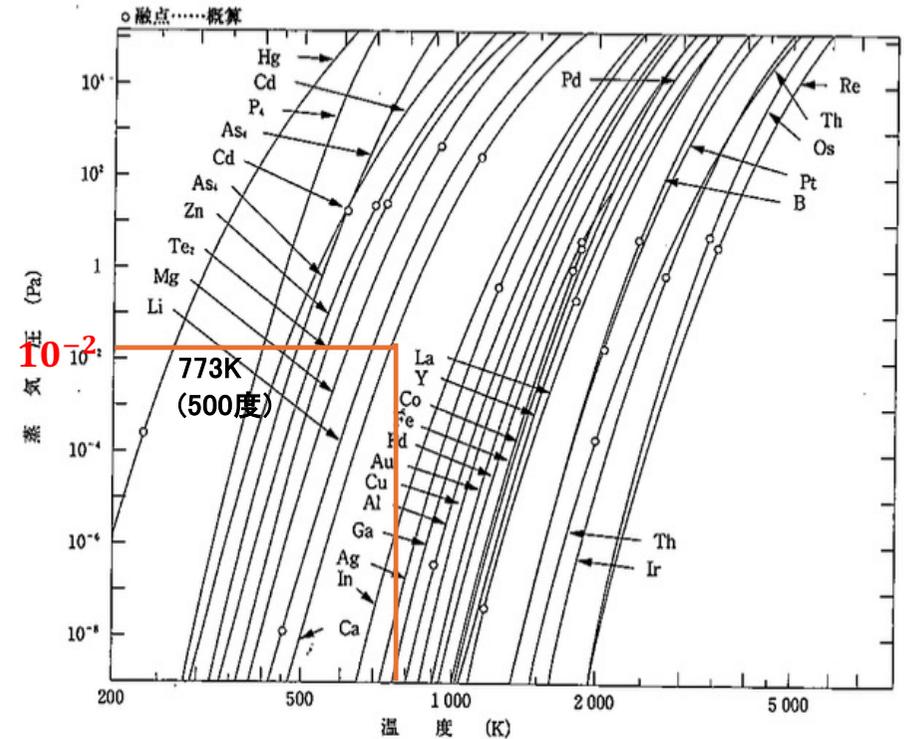


Ca Atom density

✦ Ca温度: 500°C (773K)の時、蒸気圧: ~1E-2 Pa

✦ 理想気体の状態方程式

$$n = \frac{P}{k_B T} \approx 9.37 \times 10^{11} \text{ [atom/cm}^3\text{]}$$



Ca同位体存在比

40Ca: 96.941%

42Ca: 0.647%

43Ca: 0.135%

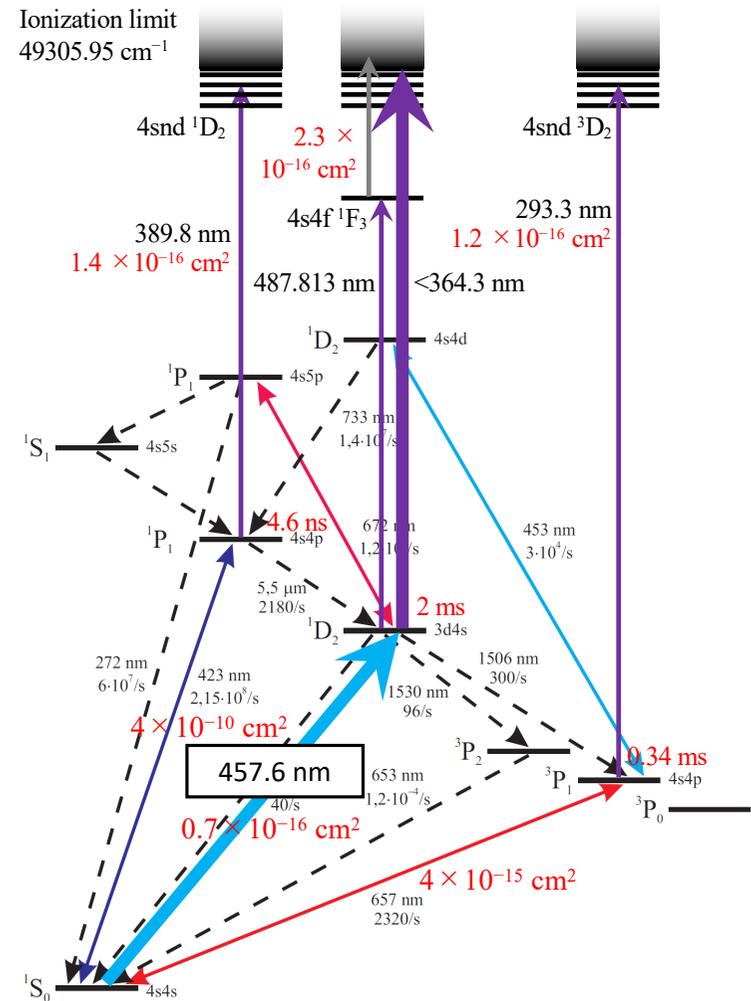
44Ca: 2.086%

48Ca: 0.187%

同位体	天然存在比 [%]	半減期	波長 [nm]	周波数 [THz]	同位体シフト [MHz]
⁴⁰ Ca	96.941	—	422.79179	709.07823	0
⁴¹ Ca	—	9.94 × 10 ⁴ [y]	—	—	—
⁴² Ca	0.647	—	422.79156	709.07862	385.7
⁴³ Ca	0.135	—	N.A.	N.A.	N.A.
⁴⁴ Ca	2.086	—	422.79133	709.07901	771.5
⁴⁵ Ca	—	162.61 [d]	—	—	—
⁴⁶ Ca	0.004	—	422.79110	709.07940	1157.2
⁴⁷ Ca	—	4.536 [d]	—	—	—
⁴⁸ Ca	0.187	—	422.79089	709.07975	1509.4

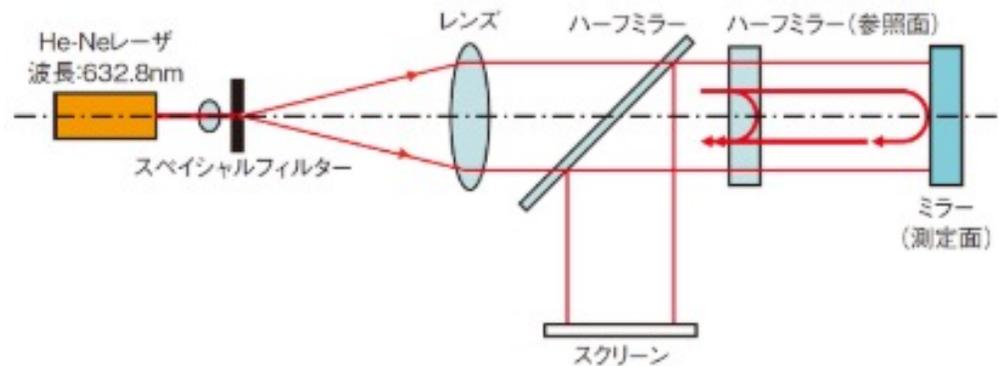
イオン化法

- ✦ レーザー偏向法と平行して研究が進んでいる.
- ✦ 2波長のレーザーが必要.
 - ➡ 選択励起用のレーザー & イオン化用のレーザー
(457.7 nm) (364 nm)
- ✦ CANDLESの現在は,
大強度のUV域のレーザーの作成が結構大変.
- ✦ 457.7 nm遷移の吸収断面積も小さい😭



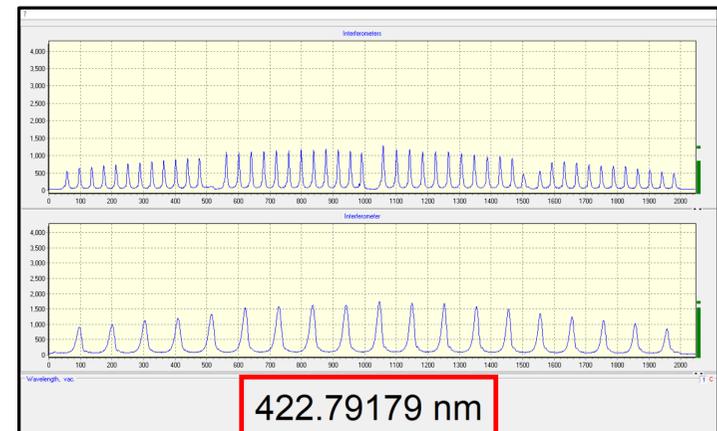
波長計(WS/7)の原理

✦ フィゾー干渉計+干渉縞をCCD/カメラで撮像,



✦ 干渉縞の位置パターンからフーリエ解析より波長を逆算.

反射した面の位置によっても光路長が変わる.



Rayleigh分布

- ✦ コリメータ穴を通過できるのは、 $v_z > 0$ の粒子で、かつ速度の大きいCaほど単位時間に多く通過する。
- ✦ るつぼ内の速度分布 (3D Maxwell-Boltzmann)

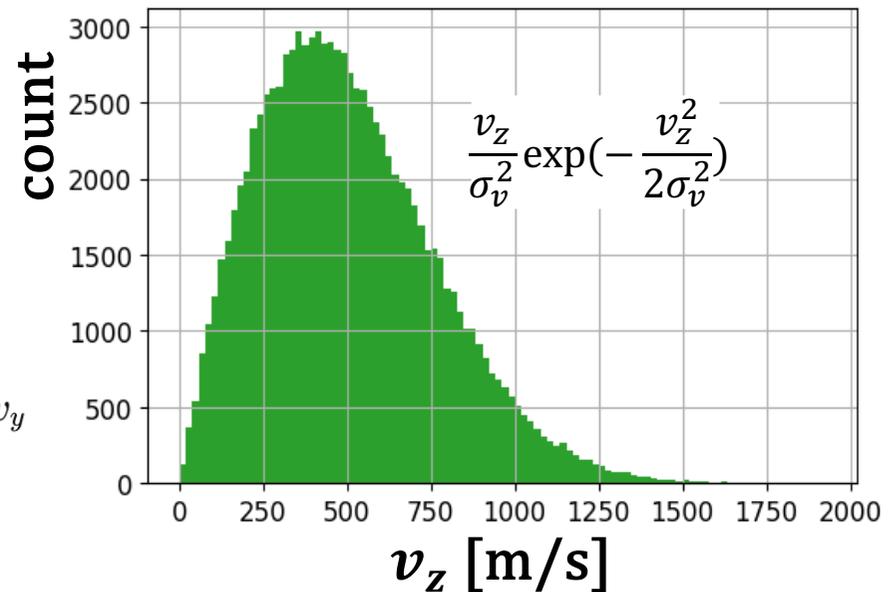
$$f_{\text{MB}}(\vec{v}) \propto \exp\left(-\frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2kT}\right)$$

- ✦ コリメータ穴を通過して出てくる粒子はフラックスで重みづけ

$$f_{\text{flux}}(\vec{v}) \propto v_z f_{\text{MB}}(\vec{v}) \quad (v_z > 0)$$

- ✦ v_z の分布 (v_x, v_y を積分.)

$$f(v_z) \propto \iint v_z \exp\left(-\frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2kT}\right) dv_x dv_y$$
$$\propto v_z \exp\left(-\frac{mv_z^2}{2kT}\right) \quad (v_z > 0)$$



自然幅

有限の励起寿命 τ を持つとスペクトル線に周波数の広がりが生じる。
放射される光の寿命に依存し、ローレンツ関数計の分布を持つ。

$$\Delta\nu \cdot \tau \sim \frac{1}{2\pi}$$

自然幅は励起状態の指数減衰に起因しており、フーリエ変換よりローレンツ型のスペクトルが現れる。

$$I(\omega) \propto \frac{1}{(\omega - \omega_0)^2 + (\Gamma/2)^2}$$

ドップラーシフト

原子の速度分布がマクスウェル分布(=ガウス分布)なので、

$$f(v_z) \propto \exp\left(-\frac{mv_z^2}{2kT}\right)$$

周波数シフトは速度に比例.

$$\Delta\nu = \frac{v_z}{c}\nu_0$$

コリメート ドップラーシフト

✦ コリメータの(幾何学的な)最大発散角:

$$\theta_{Max} = \sin^{-1}(1/300) \approx 3.33 \text{ mrad}$$

✦ レーザー方向の最大速度

$$v_{\parallel, max} = v \sin \theta_{max} \simeq 2.14 \text{ m/s}$$

この速度成分に起因するドップラーシフトは

$$\Delta\nu = \frac{v_{\parallel}}{\lambda}$$

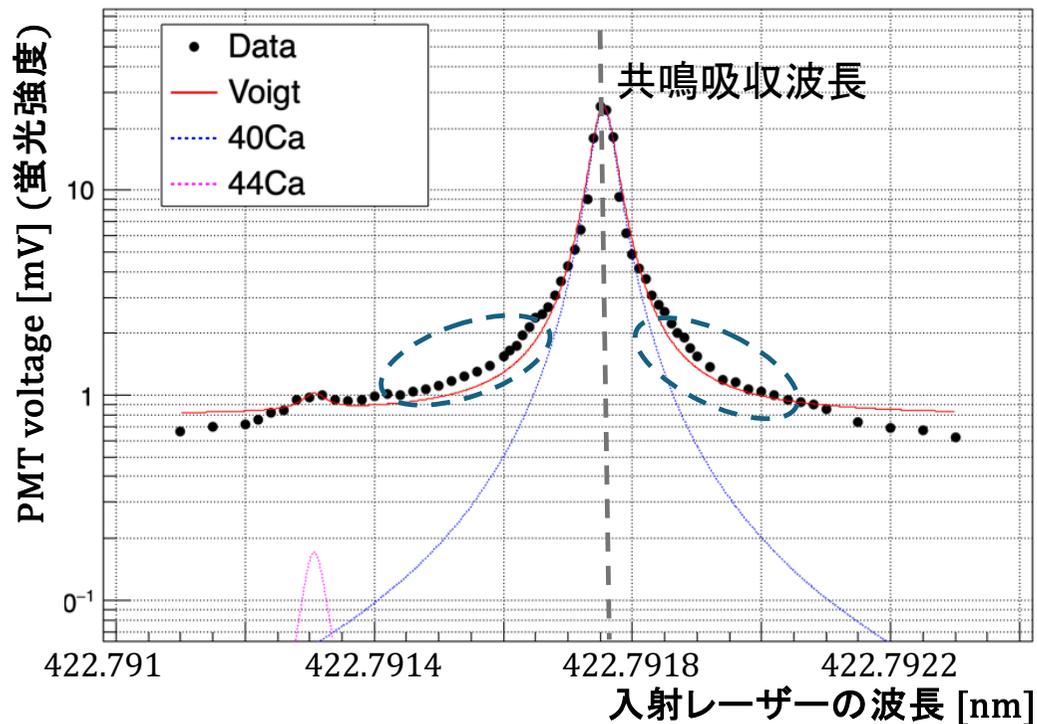
波長を $\lambda = 422.8 \text{ nm}$ とすると、最大ドップラーシフトは

$$\Delta\nu_{max} = \frac{v_{\parallel, max}}{\lambda} \simeq 5.06 \text{ MHz}$$

と評価できる。 よって、 $\sigma = \frac{5.06}{\sqrt{12}} \approx 1.46 \text{ MHz}$

fittingがあっていない

- ✦ パワー密度の高いレーザーを照射している.
- ✦ 吸収波長付近で吸収が飽和していて、⇒ ピークが頭打ち?



- ✦ レーザー強度が強く、吸収が飽和

$$\text{有効な線幅: } \delta p = \Gamma \sqrt{1 + s}$$

$$\text{飽和パラメータ: } s = \frac{I}{I_{sat}}$$

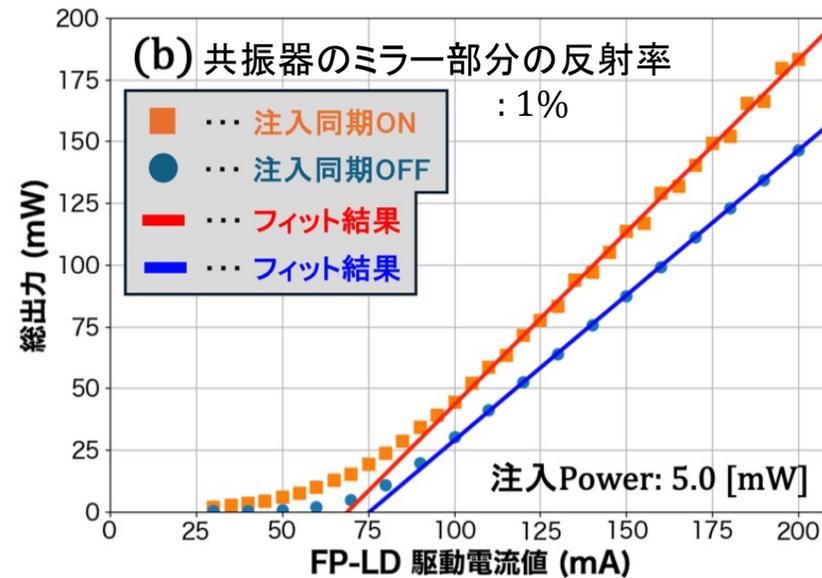
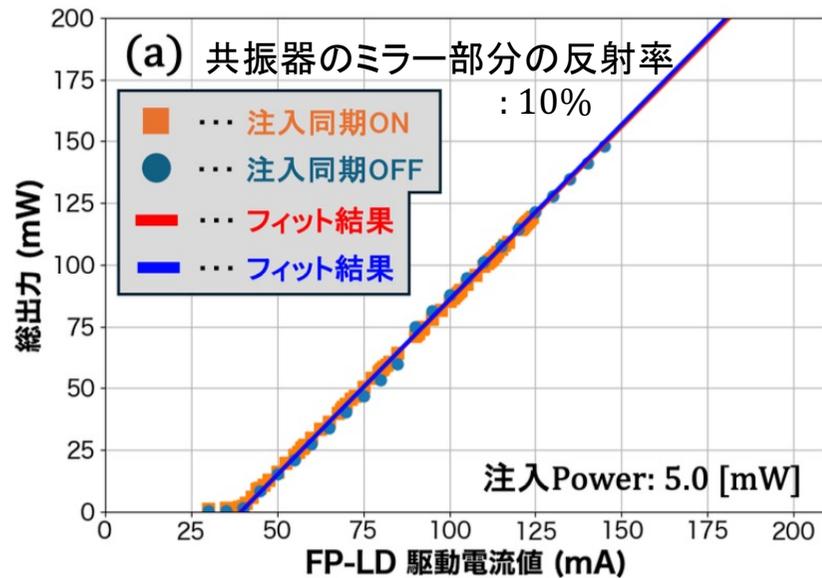
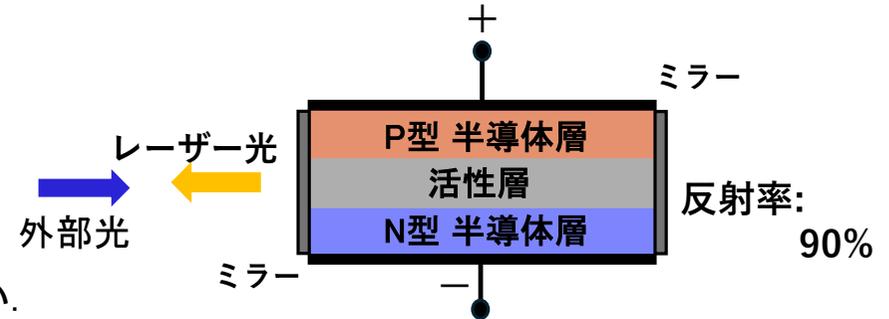
(I : 単位面積あたりのレーザー強度, I_{sat} : 飽和強度)

増幅素子選定のデータ(一部)

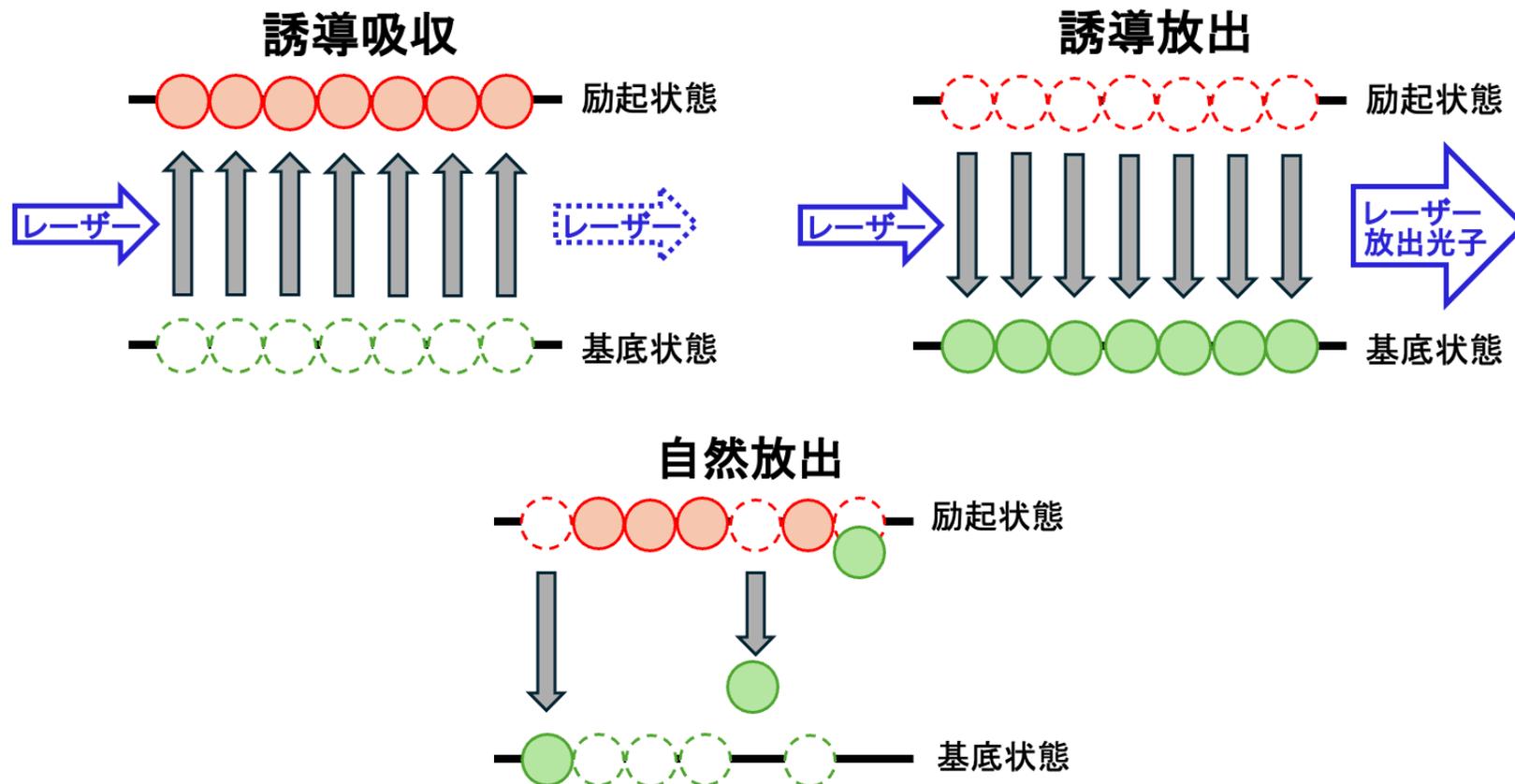
✦ Single Mode型 FP-LDについて、
 (構造がシンプルな一般的な半導体レーザー)

✦ ミラー反射率の違いによる増幅特性.

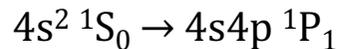
✦ 反射率の小さい素子の方が外部光の影響を受けやすい.



誘導吸収・誘導放出

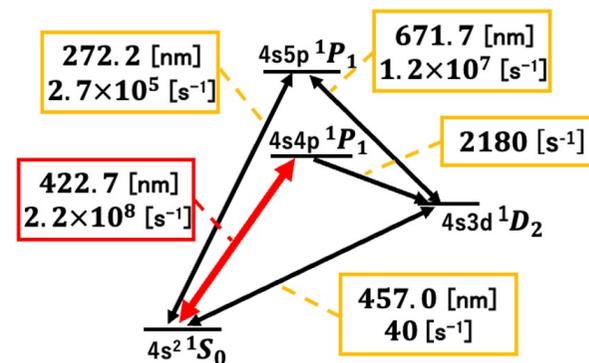
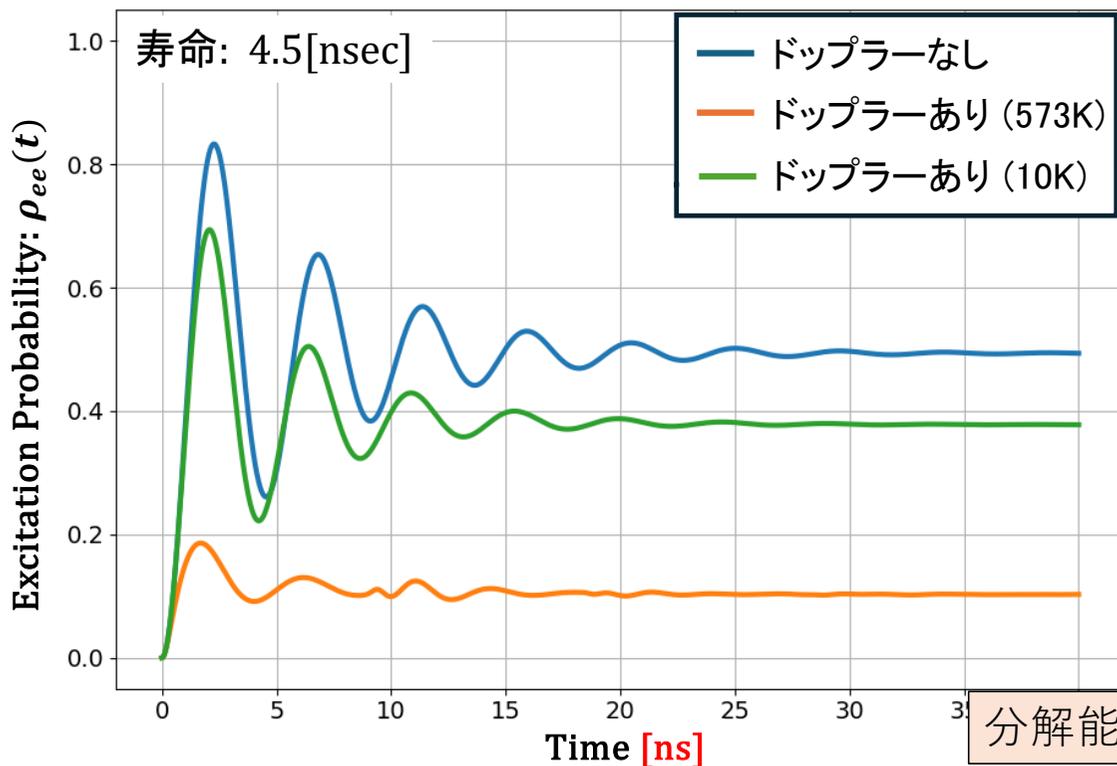


ラビ振動観測の要件洗い出し (422.79nm遷移)



✦ 2準位系の光学Bloch方程式を数值的に計算.

ラビ振動数: 220 [MHz]



自然幅 $\Delta\nu$: 35 [MHz] (比較的広い)

✦ 寿命が短く, デコヒーレンスが支配的.

・コヒーレンス損失時間: 約30[nsec].
(ドップラー考慮なし)

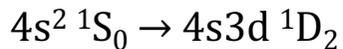
～熱セルの場合(300°C)～

ラビ振動振幅: $\frac{\Omega^2}{\delta^2 + \Omega^2}$ ($\delta \equiv \omega - \omega_{mn} - \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}$)
において, δ が相対的に大きくなる.

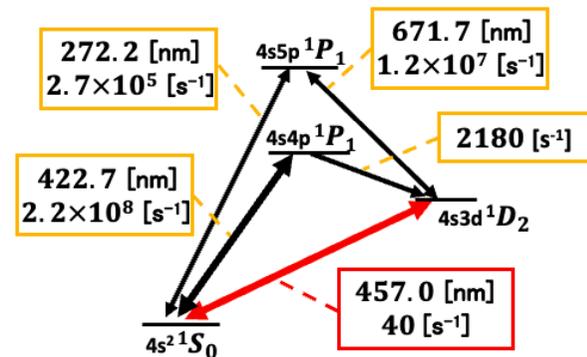
✦ ドップラーシフトによる位相緩和も発

分解能の良い測定システム+コリメートが必要.
(数[rad])

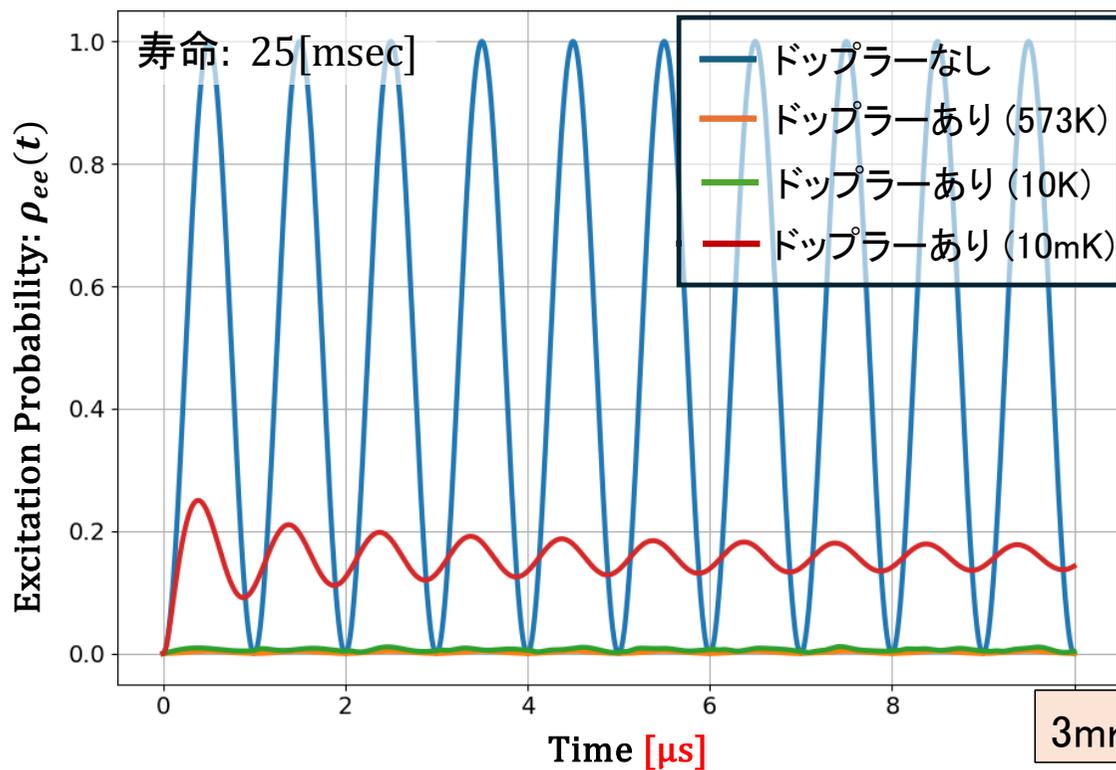
ラビ振動観測の要件洗い出し (457.69nm遷移)



✦ 2準位系の光学Bloch方程式を数値的に計算.



ラビ振動数: 1.0 [MHz]



自然幅 $\Delta\nu$: 6.4[Hz] (極狭)

✦ 寿命が長く, コヒーレンスを保ちやすい

$$\Delta\nu \cdot \tau \sim \frac{1}{2\pi}$$

➡ ラビ駆動に向いている.

✦ ドップラーシフトが主敵.

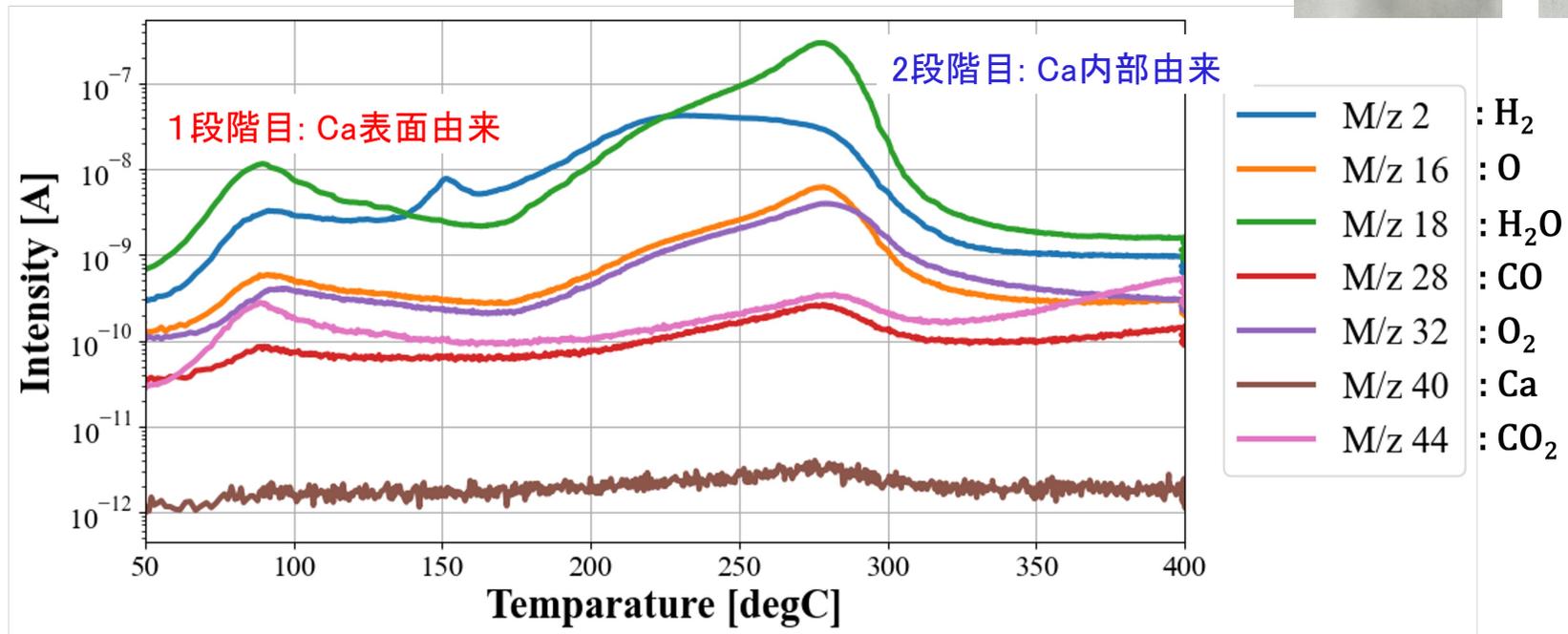
遷移双極子モーメント μ_{mn} が小さいので

ラビ振動数: Ω ($\propto \mu_{mn}$) が小さい.

ラビ振動振幅: $\frac{\Omega^2}{\delta^2 + \Omega^2}$ の δ が支配的.

3mrad程度のCaビームのコリメートが必要. 6

Caの昇温質量分析



ガウシアンビーム強度分布

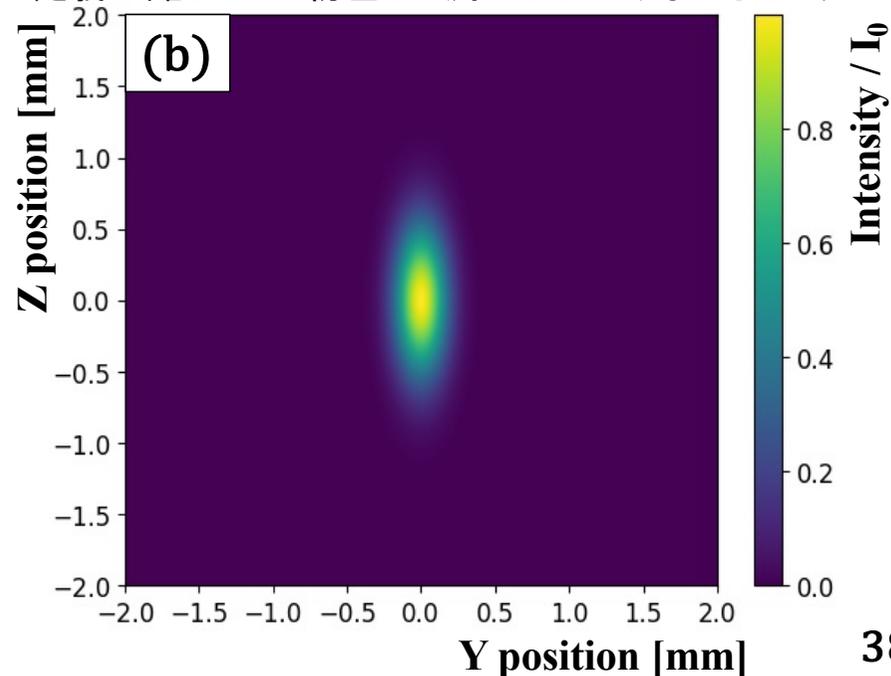
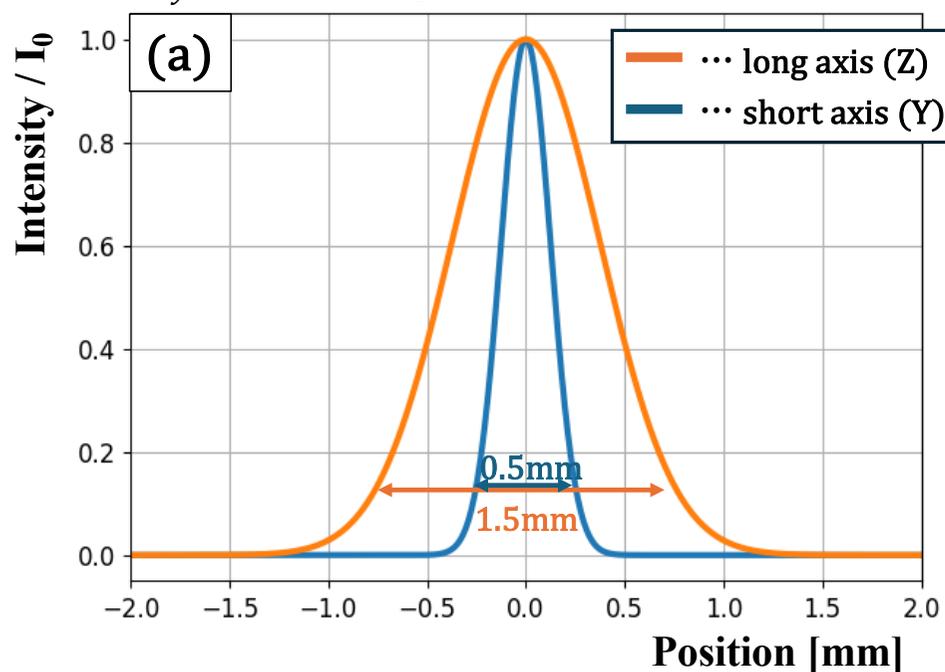
$$I_0 = \frac{2P}{\pi w_y w_z}$$

ビーム強度:

$$I(y, z) = I_0 \exp\left(-\frac{2y^2}{w_y^2} - \frac{2z^2}{w_z^2}\right)$$

I_0 はレーザーの中心強度
 w_y 、 w_z はそれぞれ短軸・長軸の $1/e^2$ 半径

$w_y = 0.25\text{mm}$, $w_z = 0.75\text{mm}$ とした。(ビームサイズの定義は難しい・・・物差しで測ってはいけないらしい)



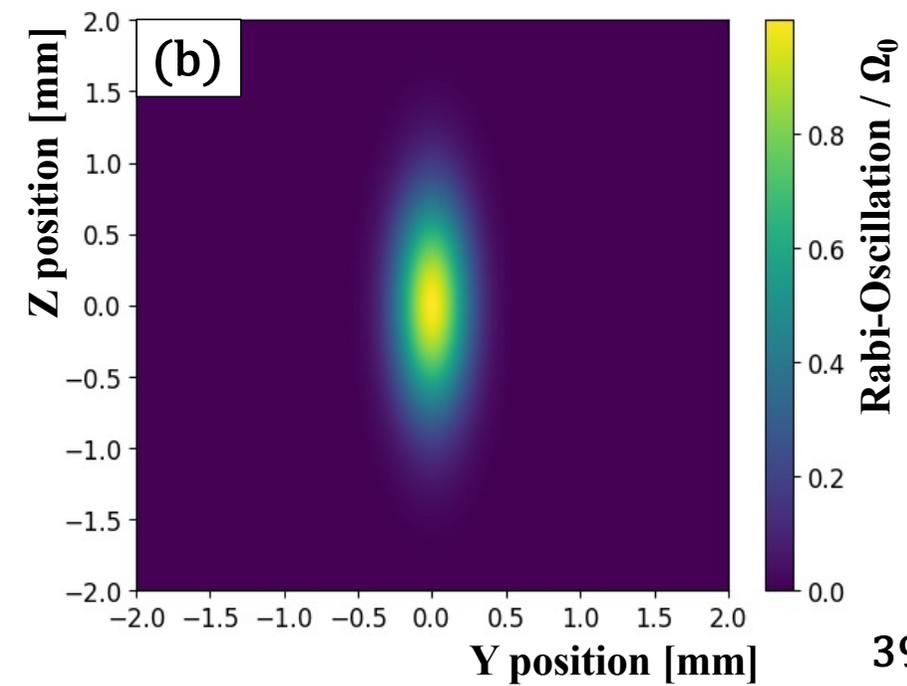
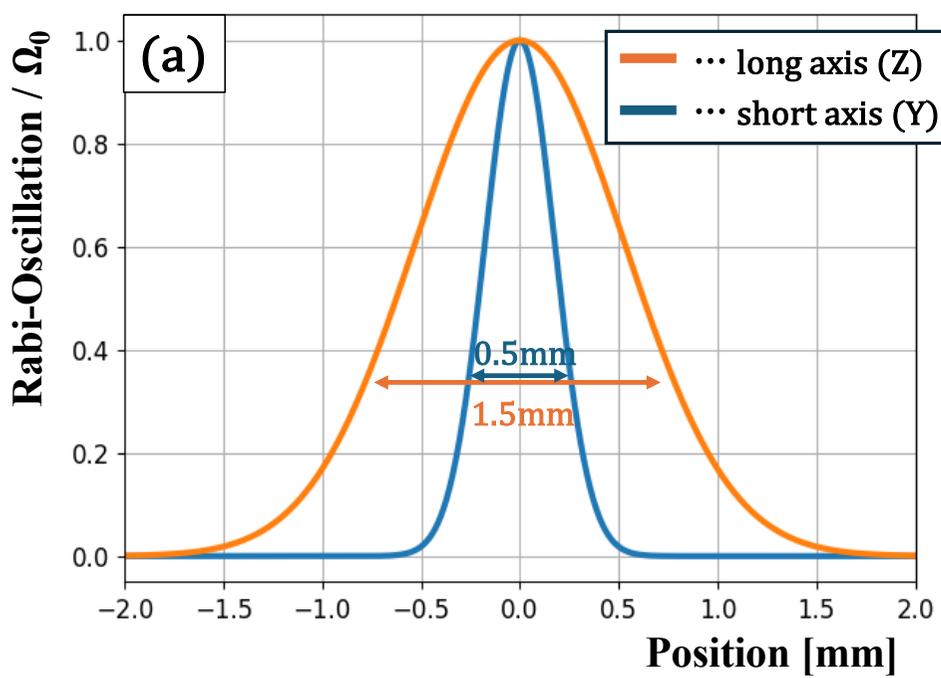
ラビ振動数の空間分布

レーザー強度: $I [W/m^2] = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2$
 ラビ振動数: $\Omega [rad/s] = \frac{\mu_{mn} \cdot E_0}{\hbar}$

ラビ振動数の空間分布

$$\Omega(y, z) = \Omega_0 \exp\left(-\frac{y^2}{w_y^2} - \frac{z^2}{w_z^2}\right), \quad \Omega_0 = \frac{\mu_{mn}}{\hbar} \sqrt{\frac{4P}{\pi c \epsilon_0 w_y w_z}} \text{ [rad/s]}$$

(指数の係数が1/2のガウシアン分布)



シリンダリカルレンズの選定

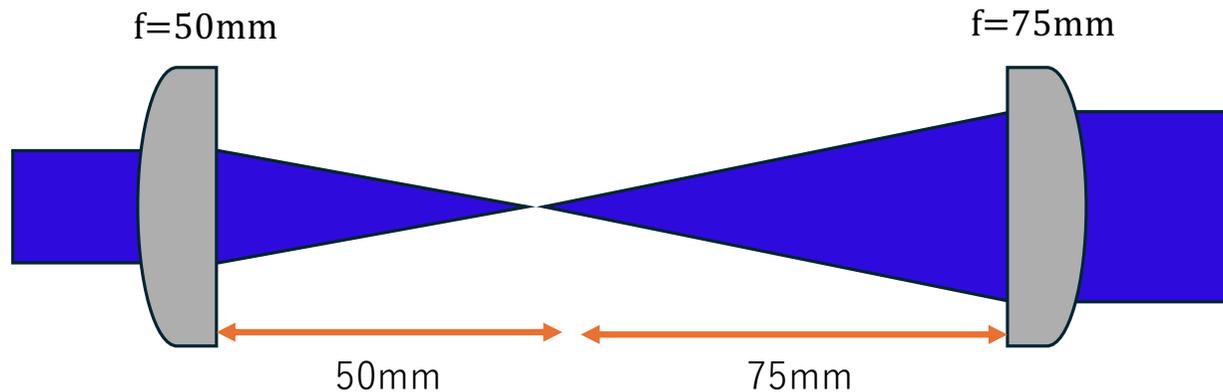
測定結果 : 約1.1mm×2.7mm (1/e²直径)
(縦) (横)



ラビ振動に向けて: 約1.5mm×0.5mm (1/e²直径)
(縦) (横)

縦: 1.36倍 f=75mm, f=50mmのシリンダリカルレンズを選定. (75/50=1.5倍)

横: 0.185倍 f=75mm, f=400mmのシリンダリカルレンズを選定. (75/400=0.1875倍)



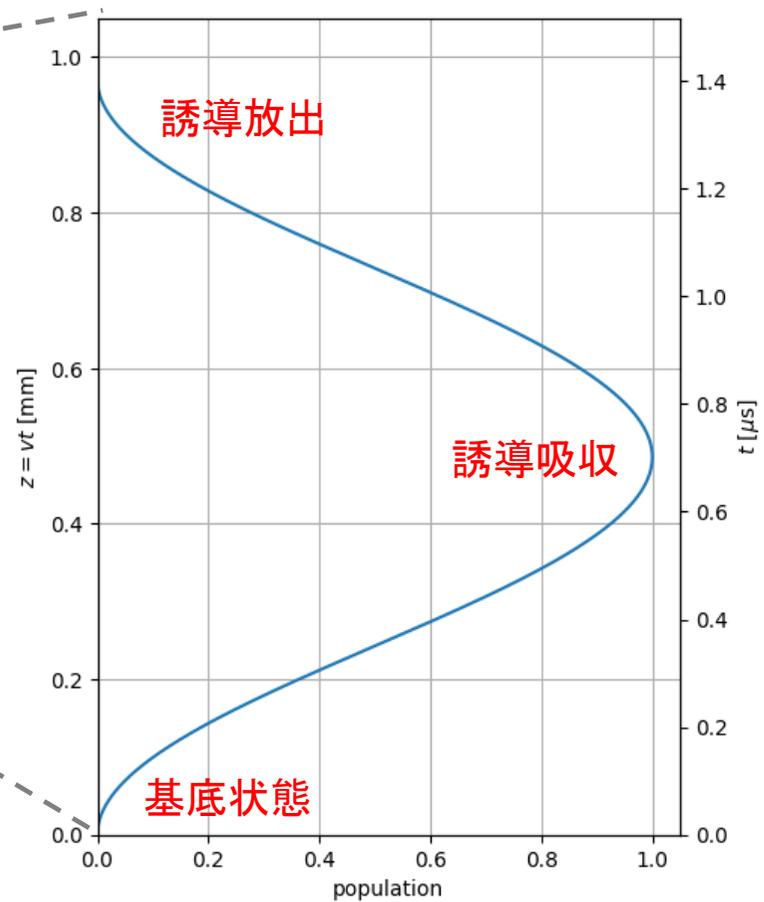
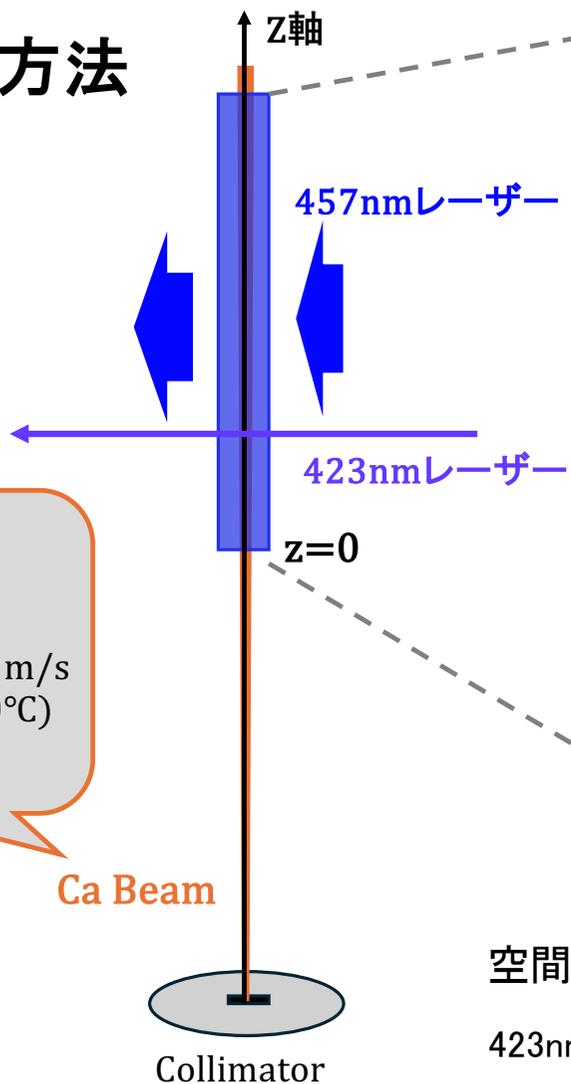
ラビ振動測定方法

- 423nm: プローブ
- 457nm: ラビ駆動

理想気体(仮)

$$v = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}} = 641 \text{ m/s} \quad (500^\circ\text{C})$$

速度が一定だと仮定



空間的に遷移状態が分かれるはず

423nmのプローブはできる限り細くして一部を照射
(高強度で当ててもいい)

(寿命: 2.5msec)

自然放出による減衰のみを考慮した時の(励起状態の)空間分布

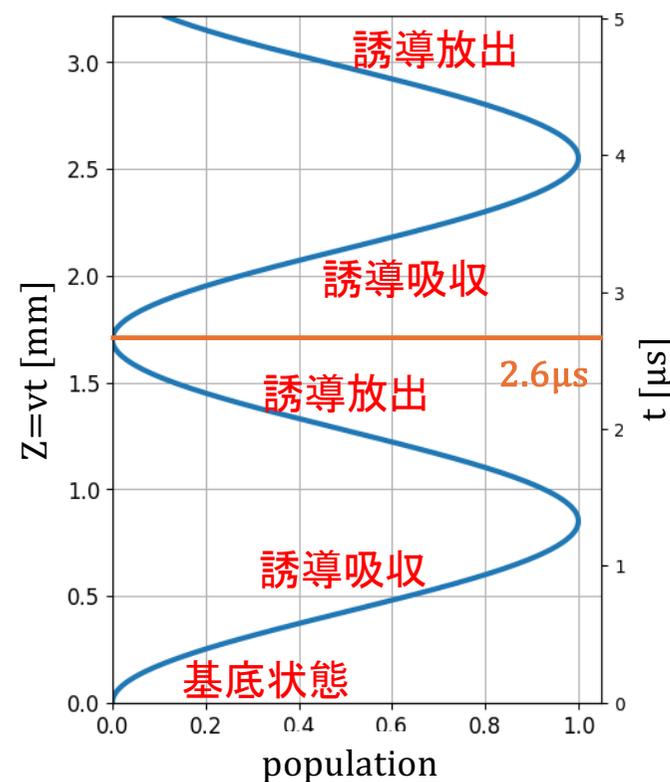
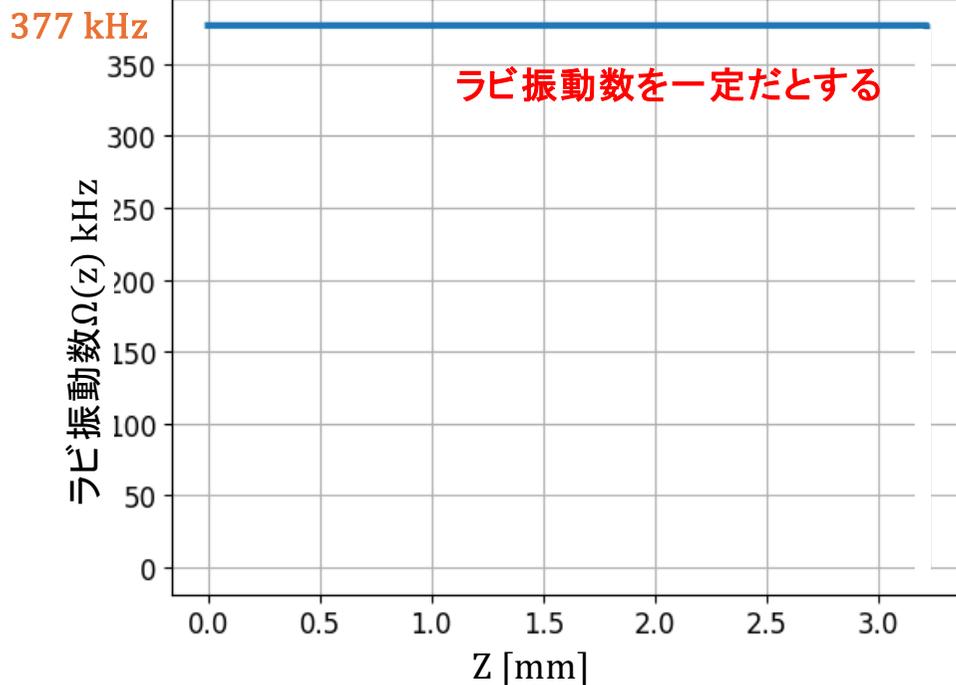
現実的な設定値

レーザーパワーP: 180mW
1/e²直径(長辺): 1.5mm = 2w_z
1/e²直径(短辺): 0.5mm = 2w_z

ビーム中心におけるラビ振動数

(Ca速度: 641m/sで一定と仮定)

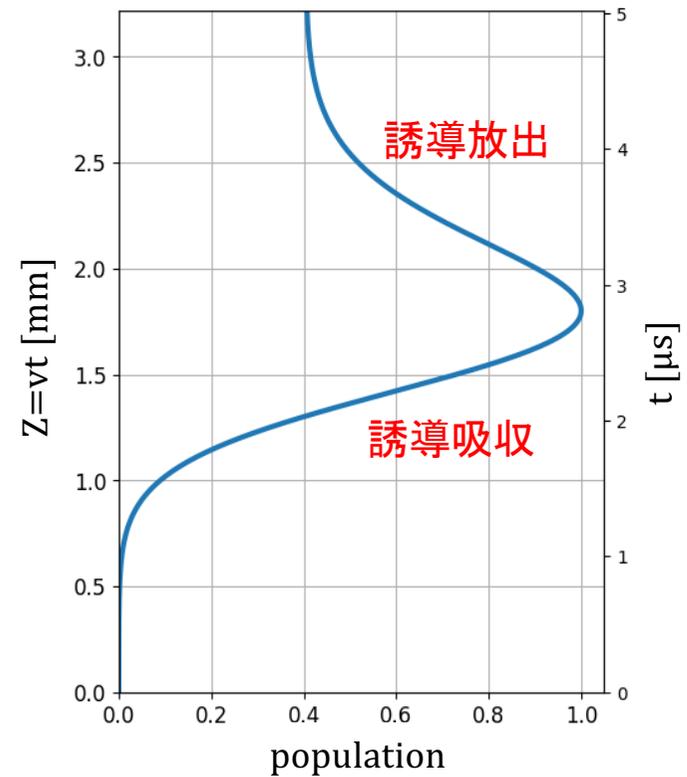
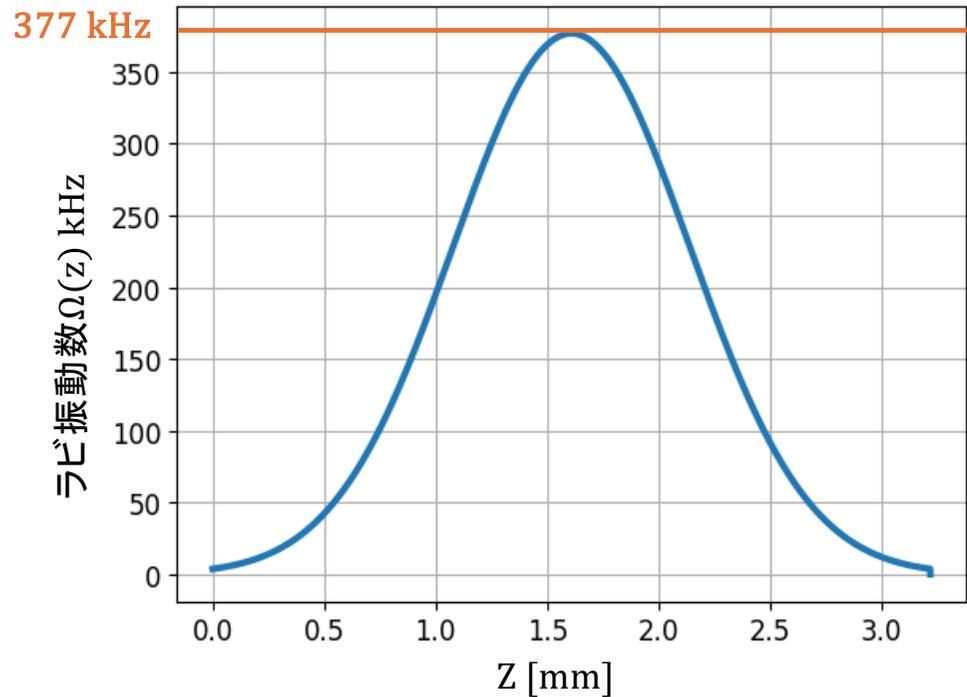
$$\Omega_0 = \frac{\mu_{mn}}{\hbar} \sqrt{\frac{4P}{\pi c \epsilon_0 w_y w_z}} \text{ [rad/s]} = 377 \text{ kHz (周期: 2.6}\mu\text{s)}$$



自然放出&ガウシアンビームを考慮した空間分布

・ラビ振動数: $\Omega(z) < \Omega_0 * 0.01$ からCaが相互作用し始めるとする. (ガウシアンは無限に広がっているので)

➡ 誘導吸収の立ち上がりが遅くなり、誘導放出も途中で終わる



+ドップラーシフトによる影響

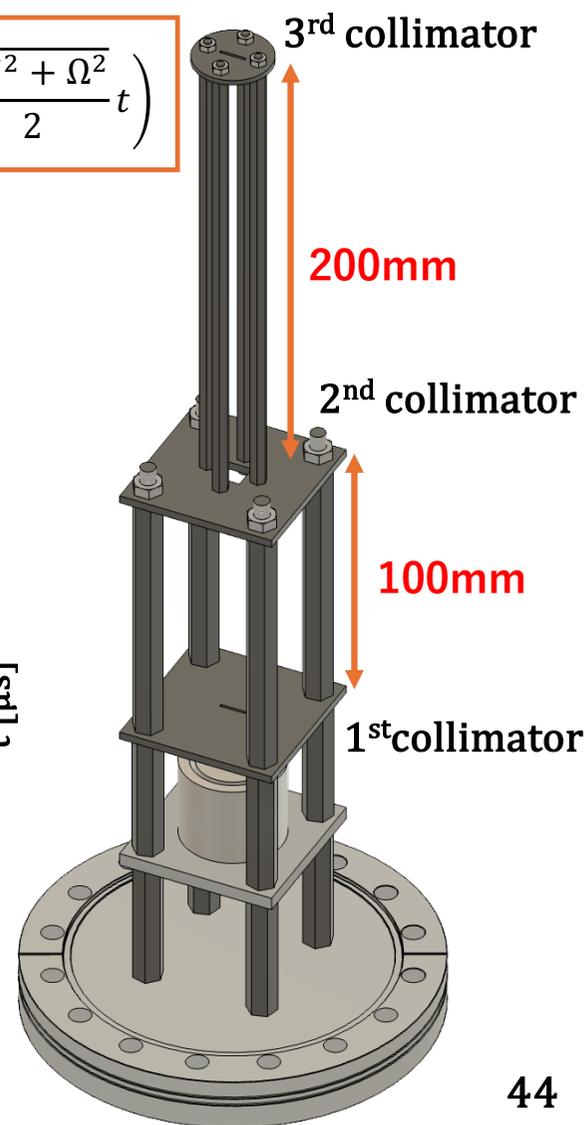
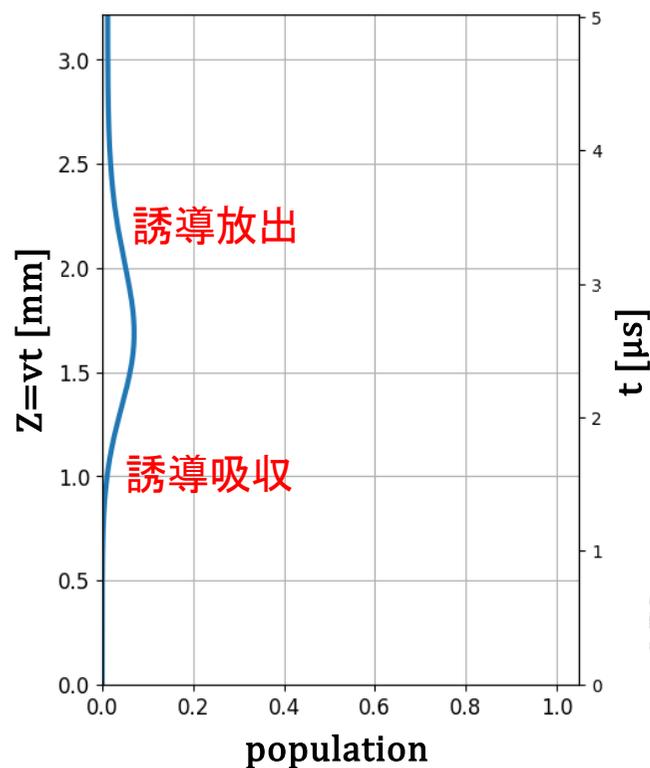
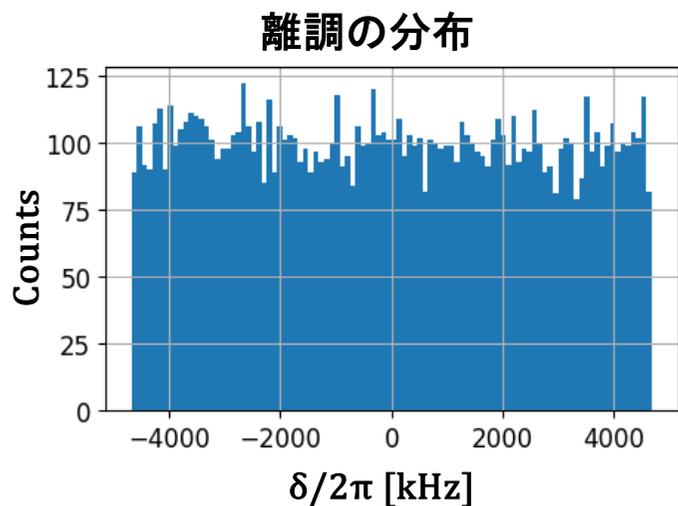
ラビ振動の式

$$|\Psi_m(t)|^2 = \frac{\Omega^2}{\delta^2 + \Omega^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\sqrt{\delta^2 + \Omega^2}}{2}t\right)$$

コリメーターによる最大発散角: $\sin^{-1}(1/300) \approx 3.33\text{mrad} \equiv \theta_{Max}$

Ca蒸気ビームの発散角は $(-\theta_{Max}, +\theta_{Max})$ の間で一様に分布する。

$$\delta/2\pi = \Delta f = \frac{v}{\lambda} \sin\theta$$



+z方向のCa蒸気ビームの速度分布

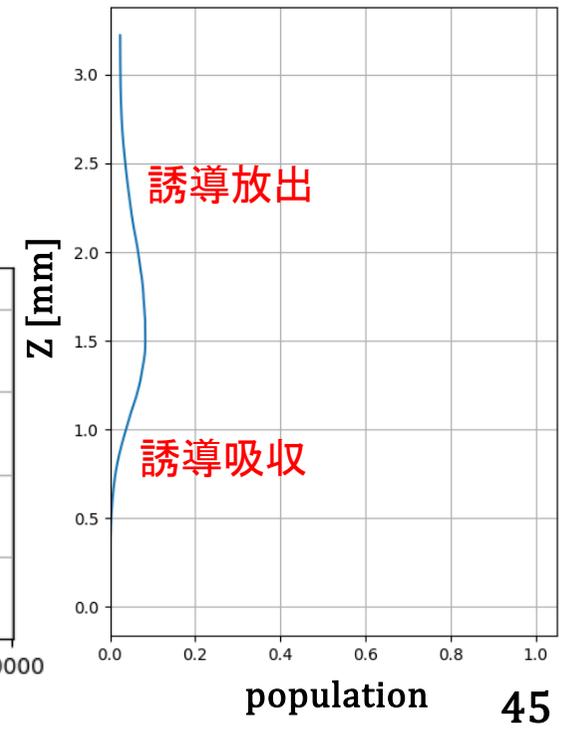
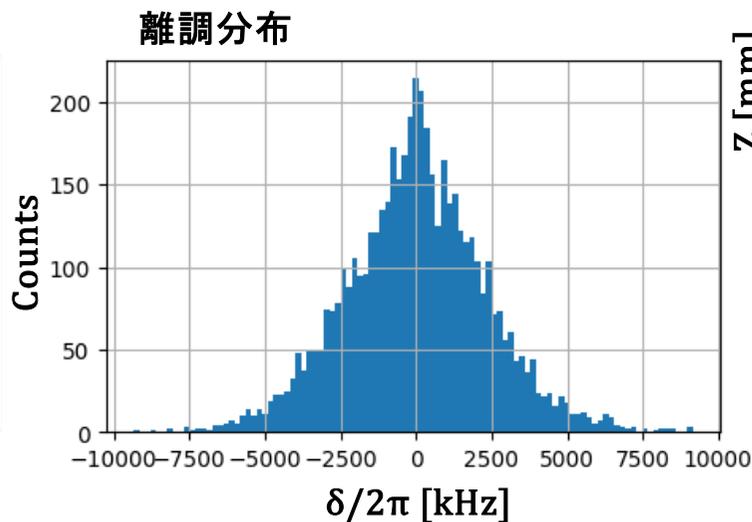
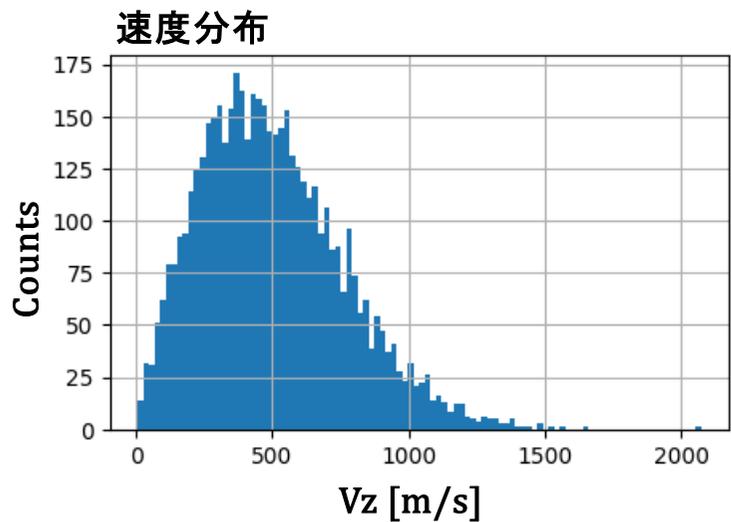
1次元Maxwell-Boltzmann 分布: $f(v_z) = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \exp\left(-\frac{mv_z^2}{2kT}\right)$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{kT}{m}}$$



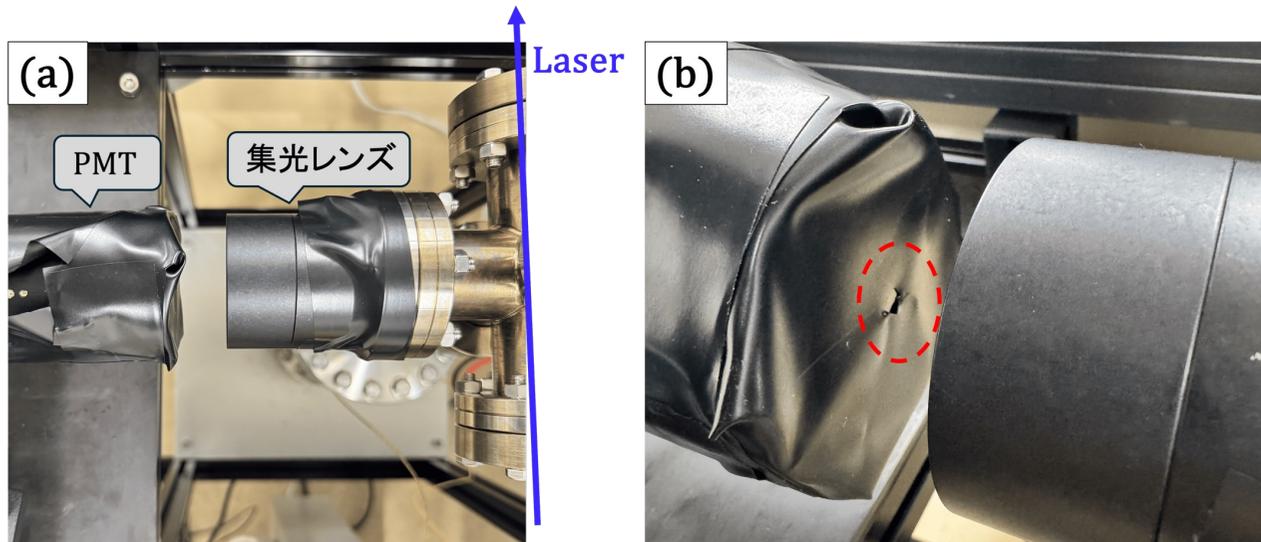
Rayleigh分布: $\frac{v_z}{\sigma_v^2} \exp\left(-\frac{v_z^2}{2\sigma_v^2}\right)$

フラックスの重み



ドップラーシフト評価のためのCa蛍光強度測定

- ✦ 原子ビームの広がりを評価するためにCa蛍光強度測定を行った
- ✦ 測定中、レーザーを共鳴吸収波長から波長を掃引。
 - ➡ Caのレーザー方向の速度分布に依存して、蛍光強度が変化する。
 - ➡ **ドップラーシフトとして評価可能.**

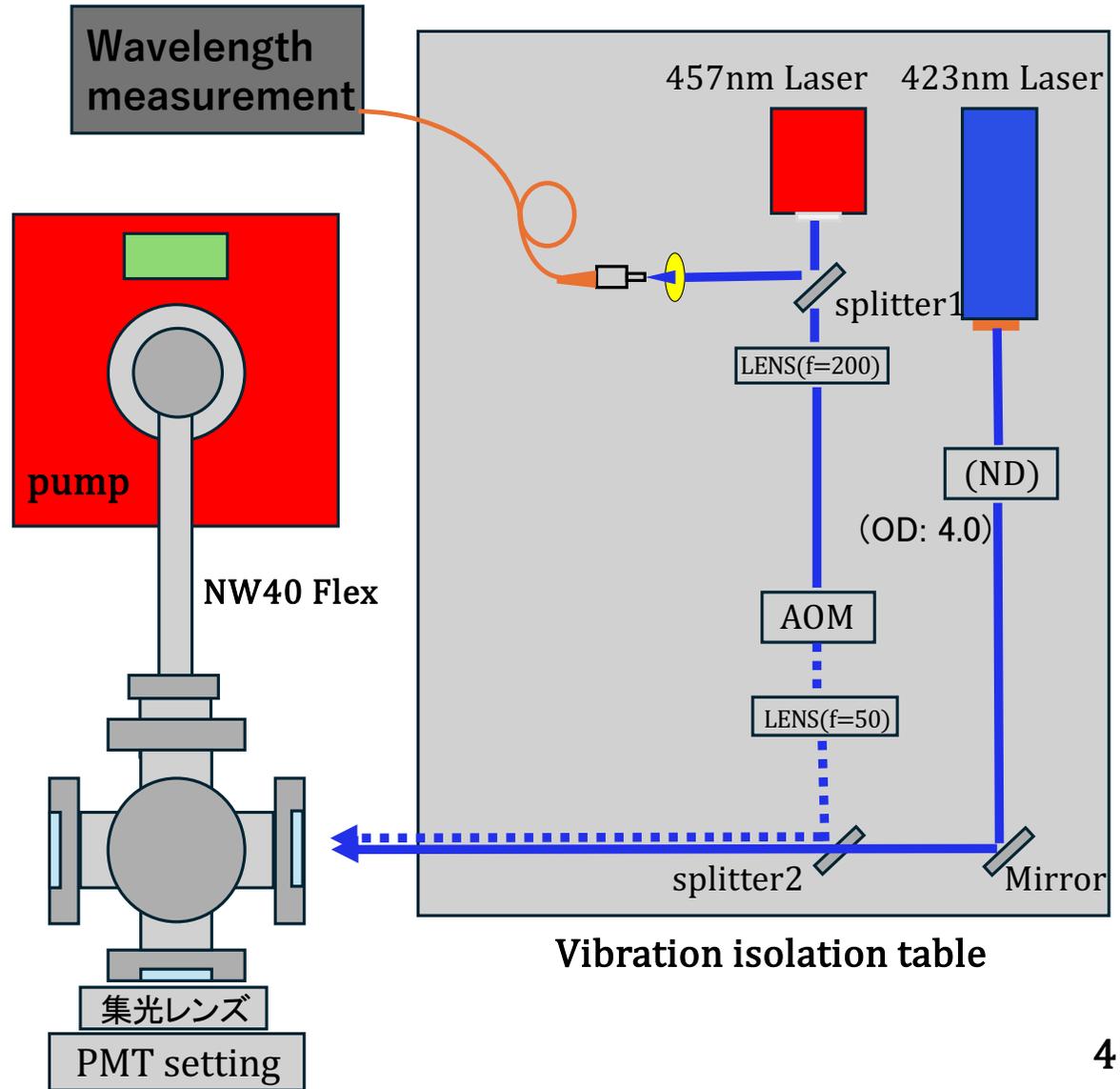
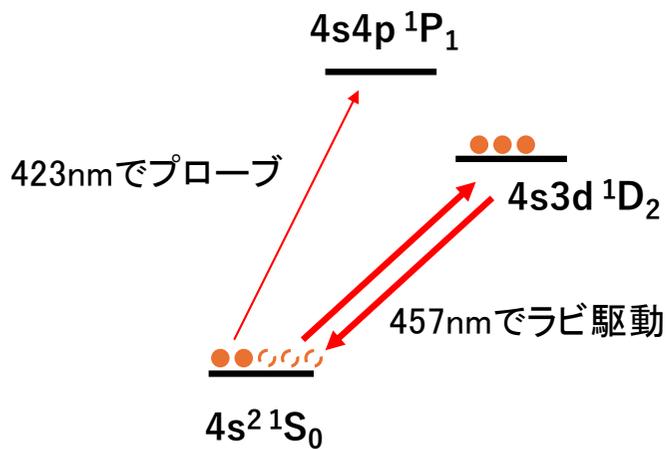


- ・集光レンズにてCaの蛍光を集光しPMTにて波長掃引した際の強度測定を行う。

Rabi oscillation observation setup.

- 457nm laser: Driving Rabi oscillation
- 423nm laser: Probe laser

Splitter1 (R:T=10:90): ~10% less power.
 Splitter2 (R:T=90:10): ~10% less power.
 Viewport (T=90%): ~10% less power.
 AOM: ~20% less power.



不要スライド

^{48}Ca を大量生産するにあたって

- ✦ 次世代検出器では tons order の ^{48}Ca が要求.
 - ➡ ^{48}Ca の大量生産が求められる.
- ✦ Ca原子ビーム & 強度の大きい偏向レーザーを複数台設置することで大量生産を目指す.
 - ➡ 大強度の偏向レーザーの開発が進んでいる.

