

二重ベータ崩壊実験用Ca同位体 のレーザー濃縮

福井大学大学院工学研究科
原子力・エネルギー安全工学専攻

仁木秀明
寺西、森下、玉川、小川

二重ベータ崩壊核種とCa同位体

二重β崩壊を起こす核種と崩壊エネルギー

同位体	崩壊エネルギー [MeV]
^{48}Ca	4.27
^{76}Ge	2.04
^{100}Mo	3.03
^{116}Cd	2.80
^{136}Xe	2.48
^{150}Nd	3.37
^{160}Gd	1.73

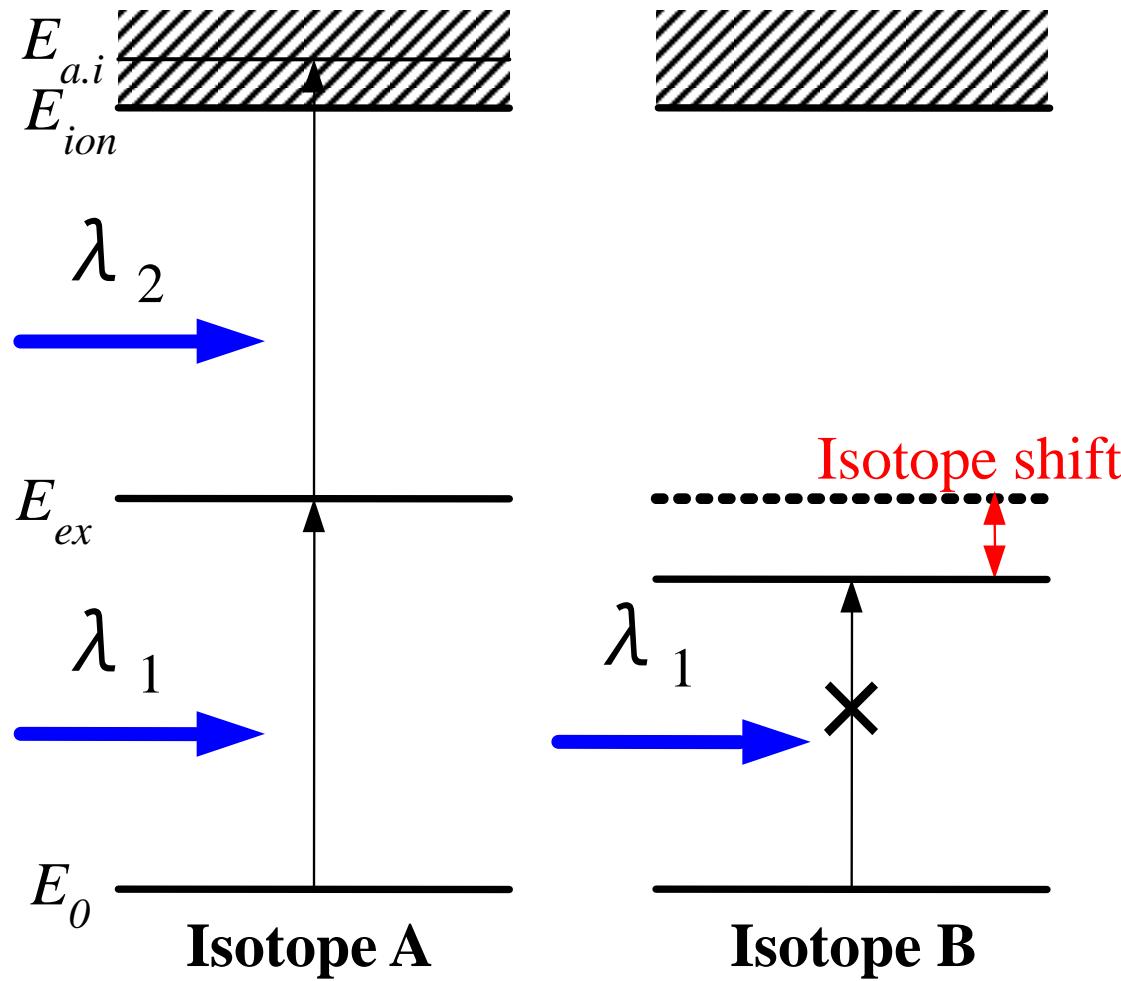
カルシウムの同位体の天然存在比

同位体	天然存在比 [%]
^{40}Ca	96.941
^{42}Ca	0.647
^{43}Ca	0.135
^{44}Ca	2.086
^{46}Ca	0.004
^{48}Ca	0.187

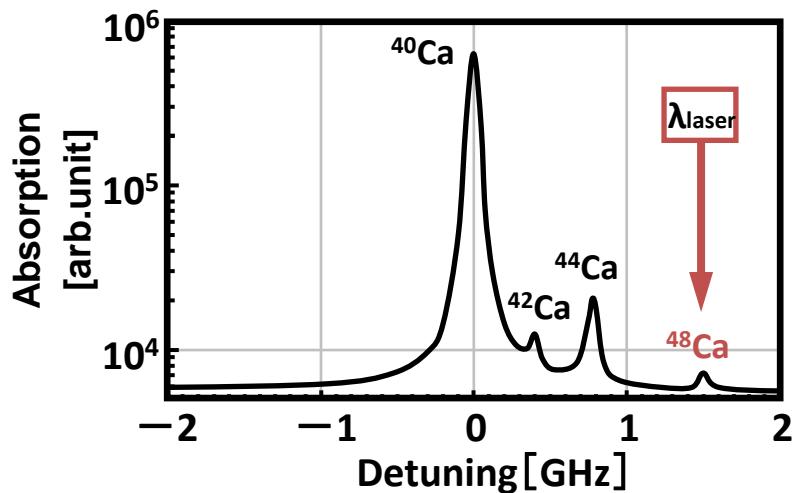
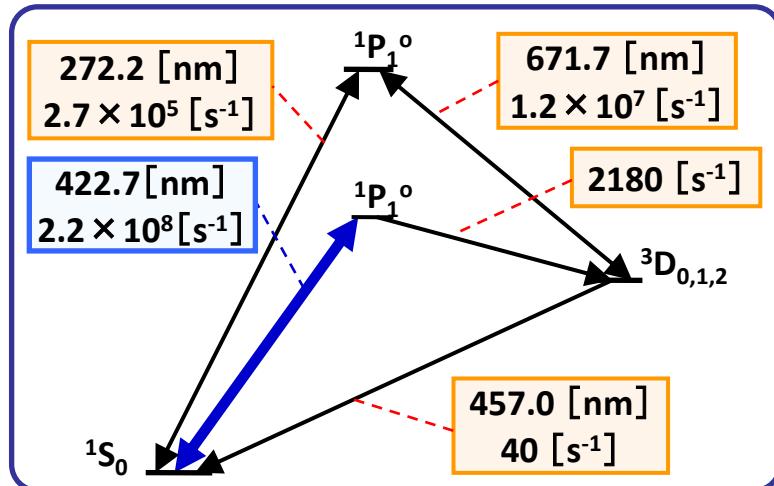
内容

- ・レーザー同位体分離の原理
- ・レーザーによる偏向法について
 - *シミュレーションによる予測
 - *偏向の評価法
 - +吸収スペクトルのドップラーシフト
 - +偏向原子の空間分布測定
(質量スペクトルの空間分布測定)
- ・選択的イオン化法

Isotopically selective excitation and ionization



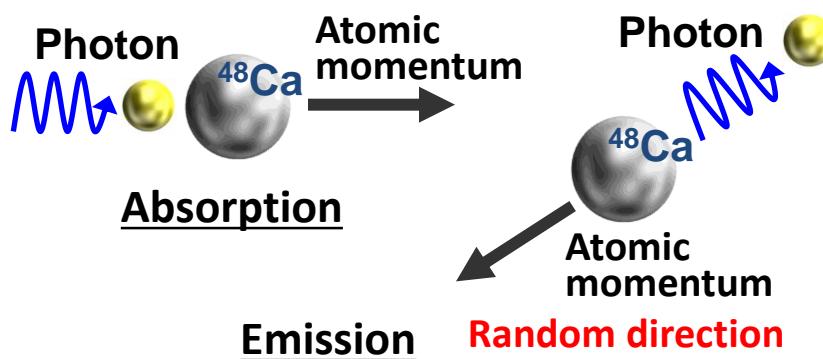
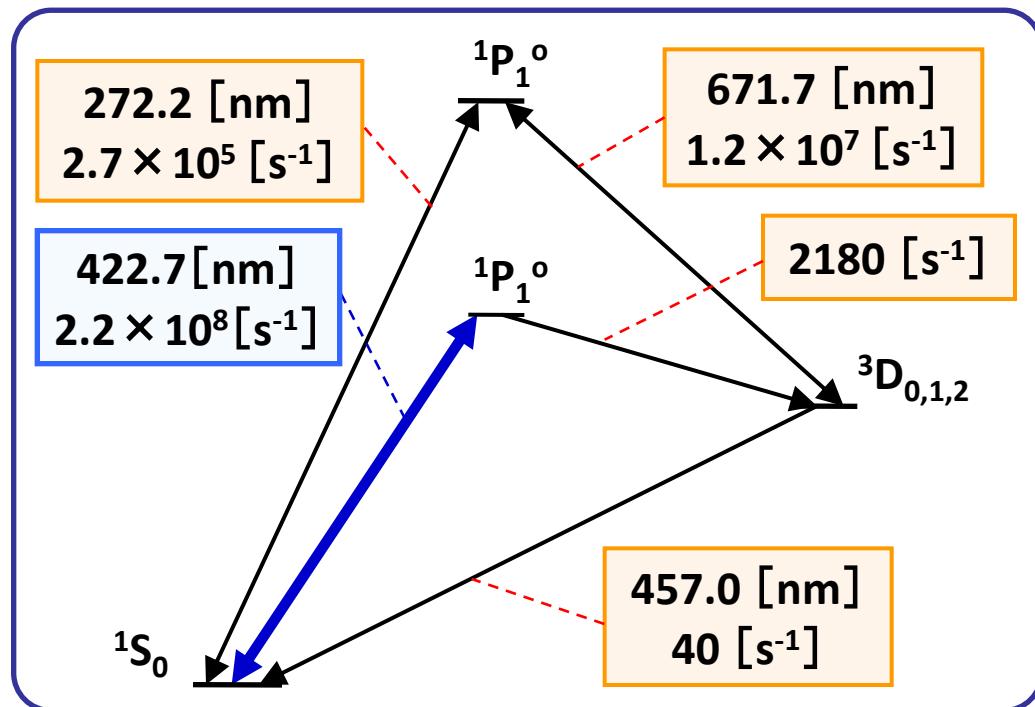
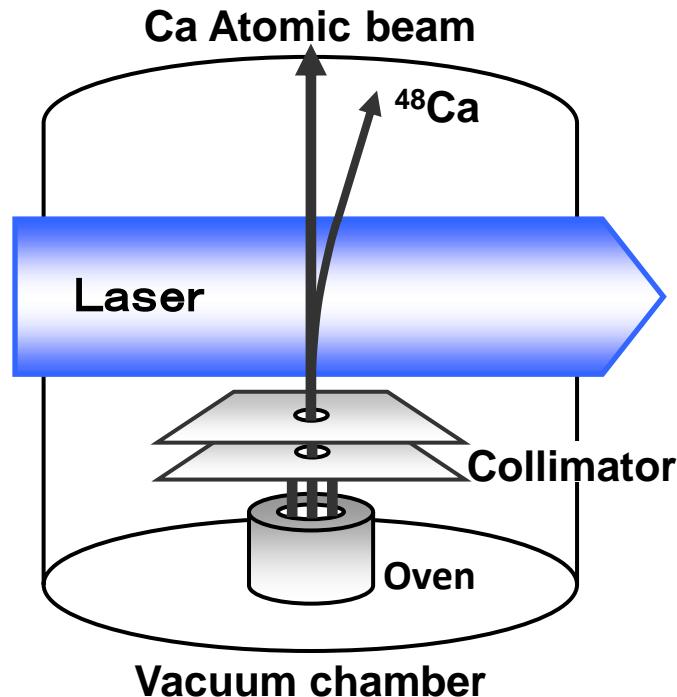
Ca原子の同位体シフトと天然存在比



Transition : ${}^1P_1 - {}^1S_0$
 $\lambda = 422.7 \text{ nm}$
 $\tau = 4.6 \text{ ns}$
 $\Delta\nu_{nat.} = \frac{1}{2\pi\tau} = 34 \text{ MHz (HWHM)}$
 $I_S = 59.9 \text{ mW/cm}^2$

	Natural Abundance [%]	Isotope Shift [MHz]
${}^{40}\text{Ca}$	96.941	-1513
${}^{42}\text{Ca}$	0.647	-1119
${}^{43}\text{Ca}$	0.135	-901
${}^{44}\text{Ca}$	2.086	-739
${}^{46}\text{Ca}$	0.004	-353
${}^{48}\text{Ca}$	0.187	0

輻射圧による ^{48}Ca の偏向



$1\text{P}_1 - 1\text{S}_0$ transition

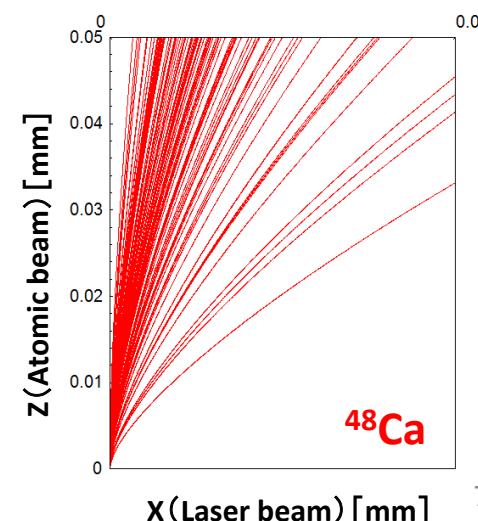
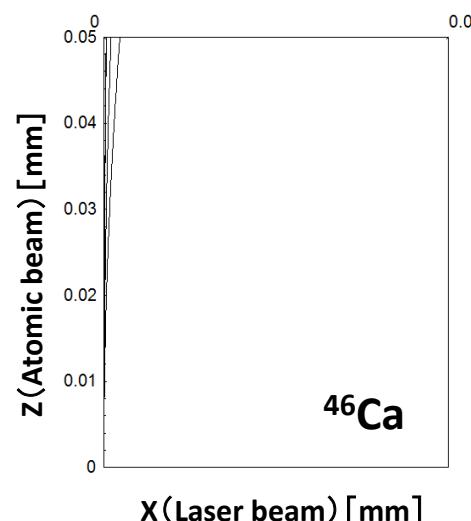
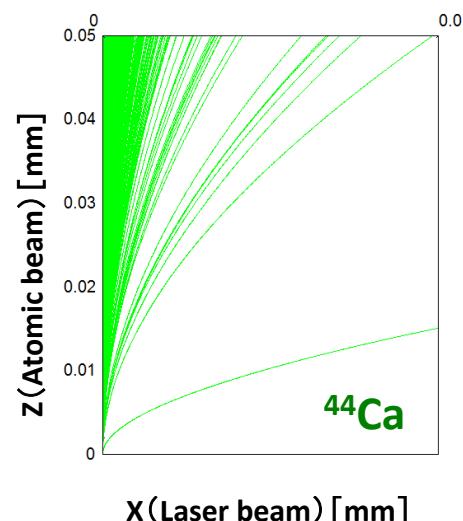
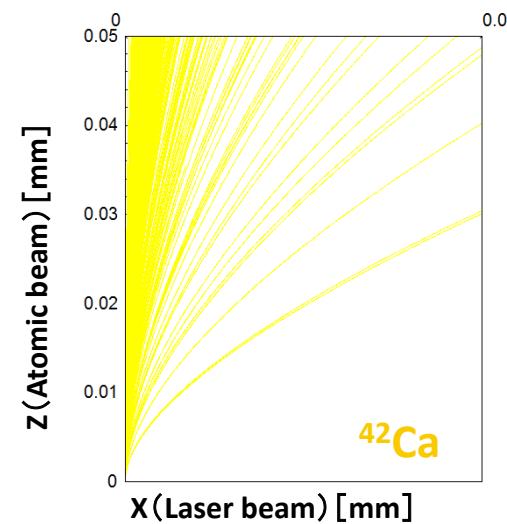
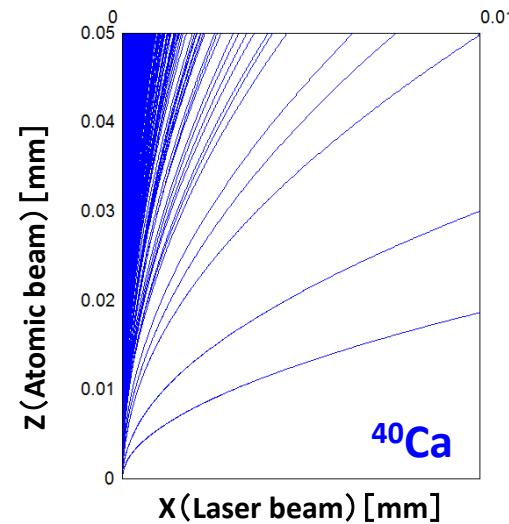
- Large transition probability
- Quasi Two-Level System

同位体の軌跡(計算例)

レーザー波長:422.7[nm]、飽和パワー:[59mW/cm²]、レーザー照射方向:xの正の向き

Ca同位体の同位体シフト

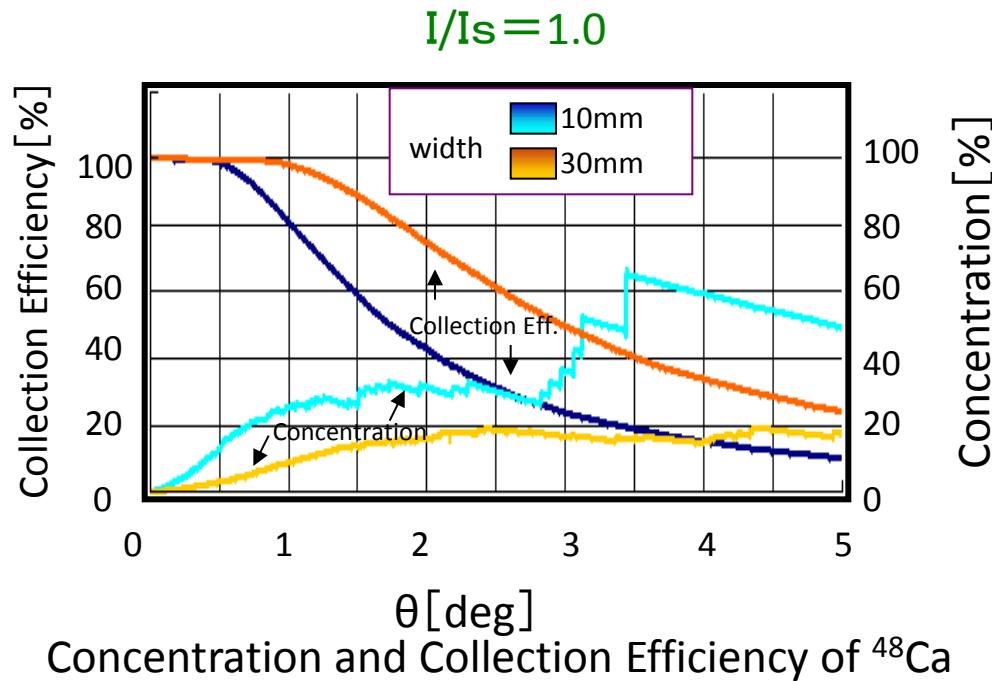
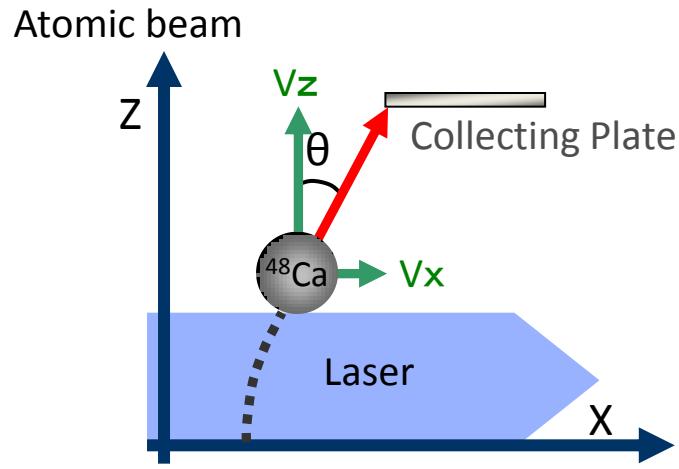
同位体	同位体シフト [MHz]
⁴⁰ Ca	0
⁴² Ca	394
⁴³ Ca	—
⁴⁴ Ca	774
⁴⁶ Ca	1160
⁴⁸ Ca	1513



シミュレーション1

偏向された原子の回収率と濃度の関係

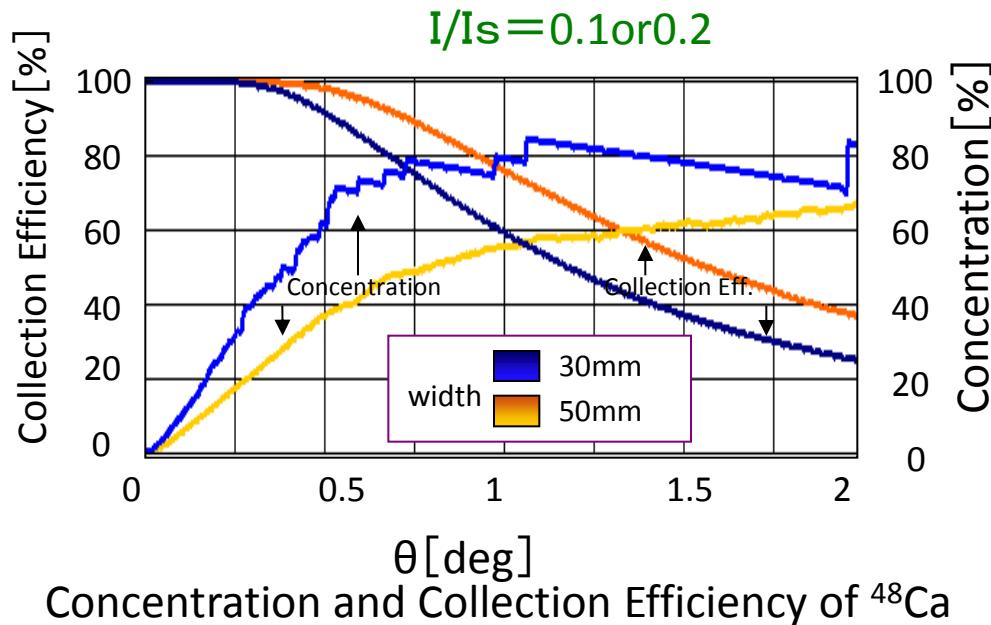
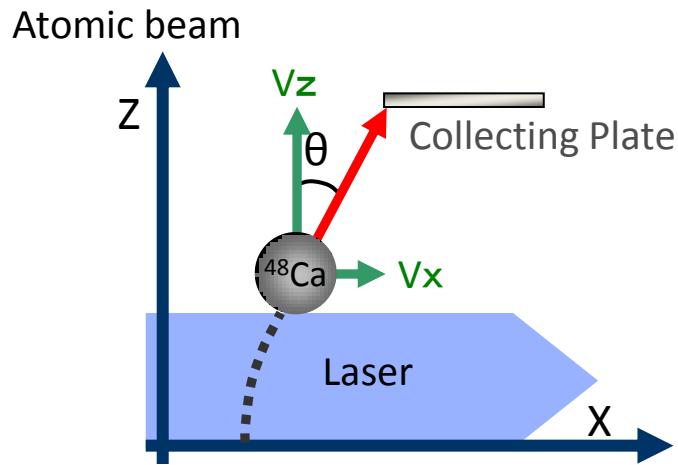
回収板では、偏向角 θ 以上の原子を回収するとする



シミュレーション2

偏向された原子の回収率と濃度の関係

回収板では、偏向角 θ 以上の原子を回収するとする



原子ビーム偏向評価

側面偏向原子のドップラーシフト測定

偏向用レーザーON, OFF時の
吸収ピーク波長のシフト量

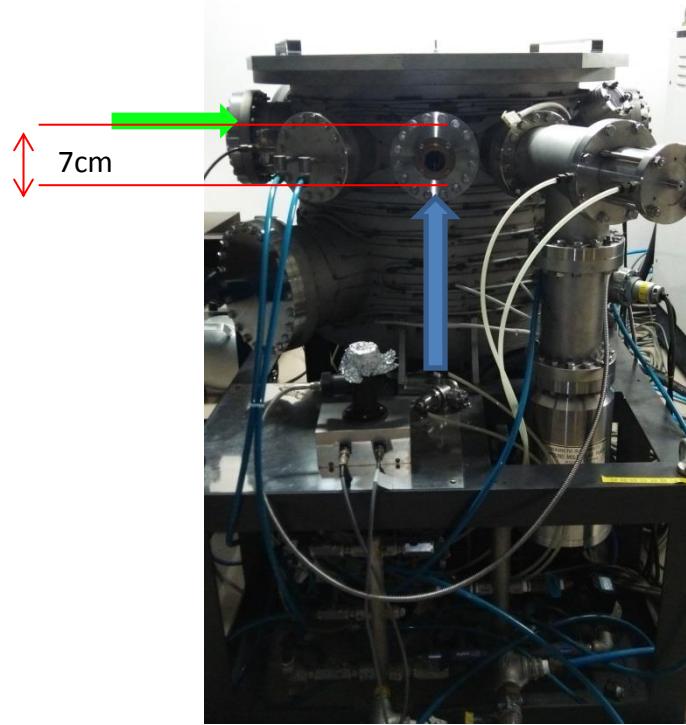
▶ LIF法によるCa-40の吸収スペクトルの測定

側面偏向原子の空間分布測定

偏向用レーザーON, OFF時の
原子ビームの空間分布(Ca-40)または同位体比

▶ 飛行時間式質量分析(TOFMS)

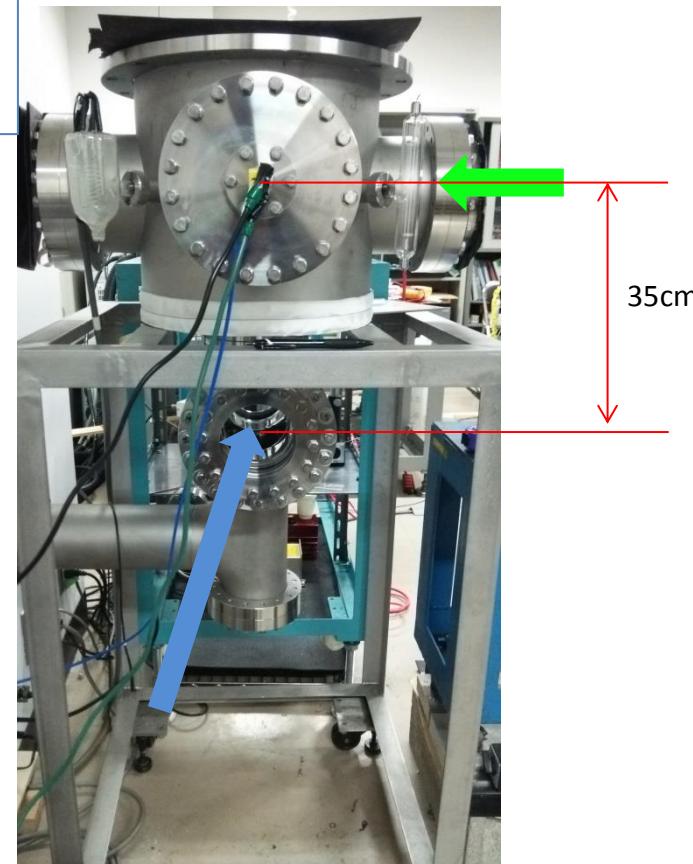
大チャンバーと小チャンバー



電子銃加熱



偏向原子のドップラーシフト測定



偏向用レーザー照射位置から
イオン化までの距離 35cm
抵抗加熱+熱電対



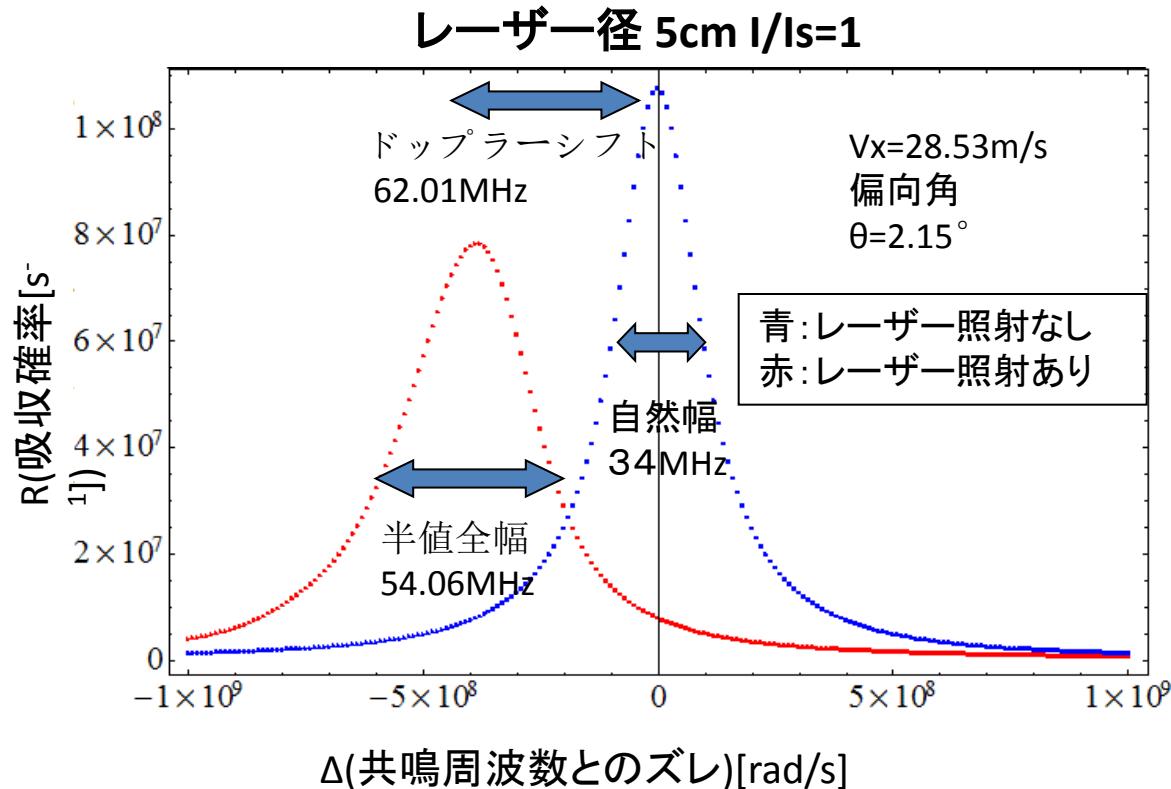
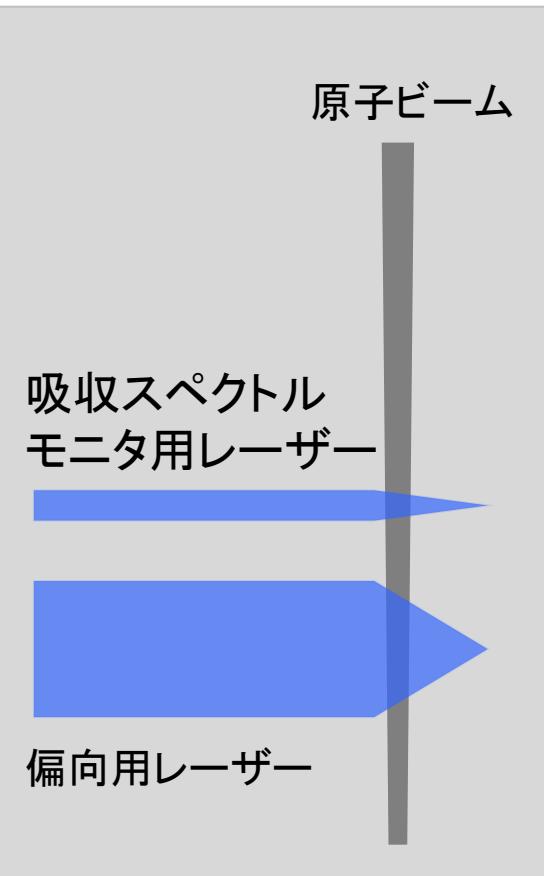
偏向原子の空間分布測定

偏向原子のドップラーシフト測定

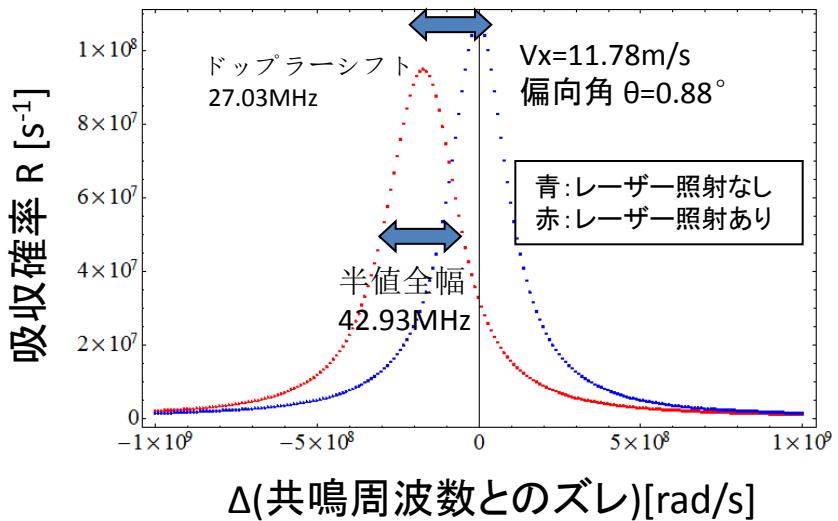
Simulation

レーザーの進行方向に運動量を得た原子はドップラーシフトにより吸収波長が変化

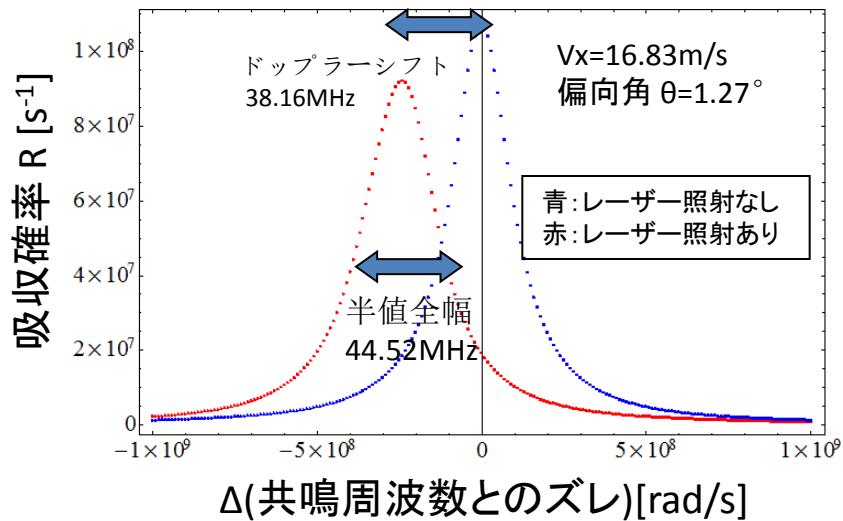
吸収スペクトルの変化を観測することで目的の同位体が偏向していることを確認できる



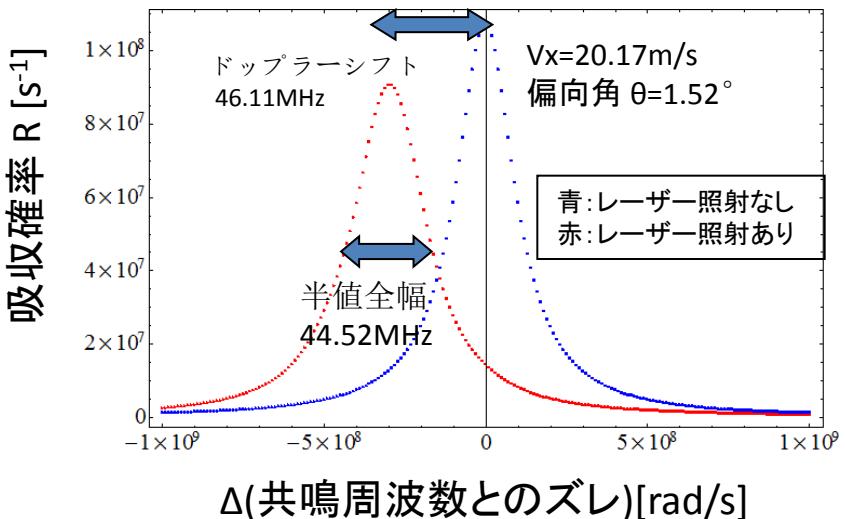
レーザー径 1cm I/I_s=1



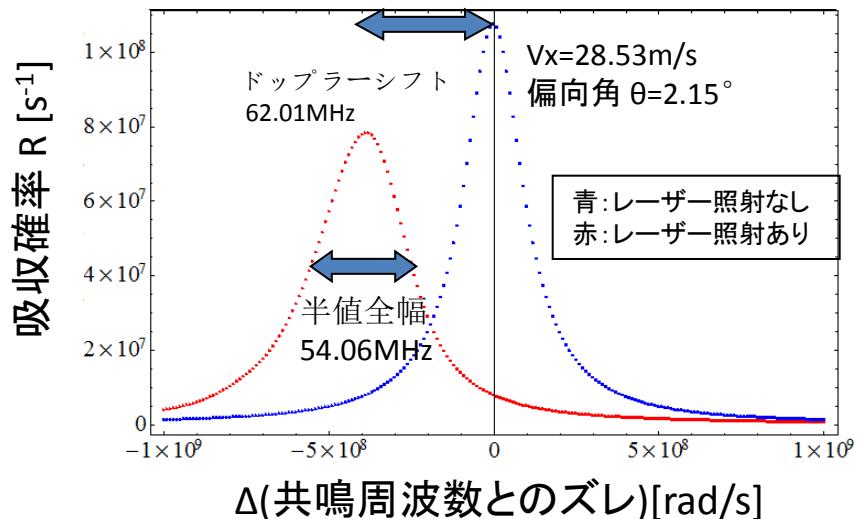
レーザー径 2cm I/I_s=1



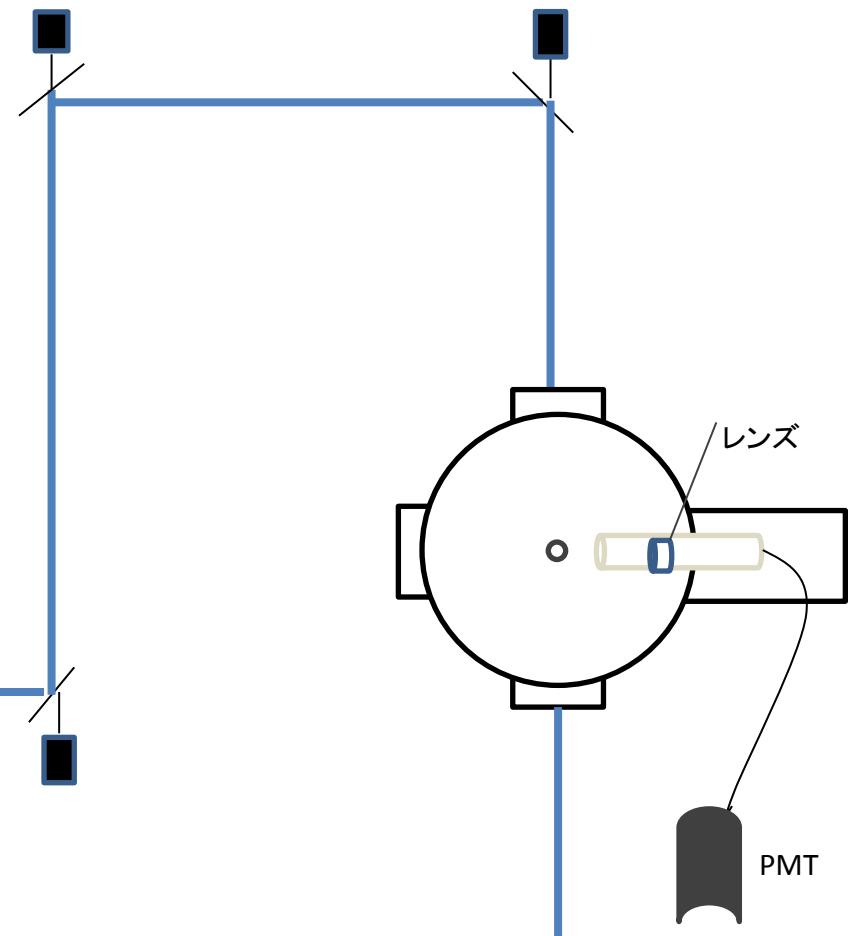
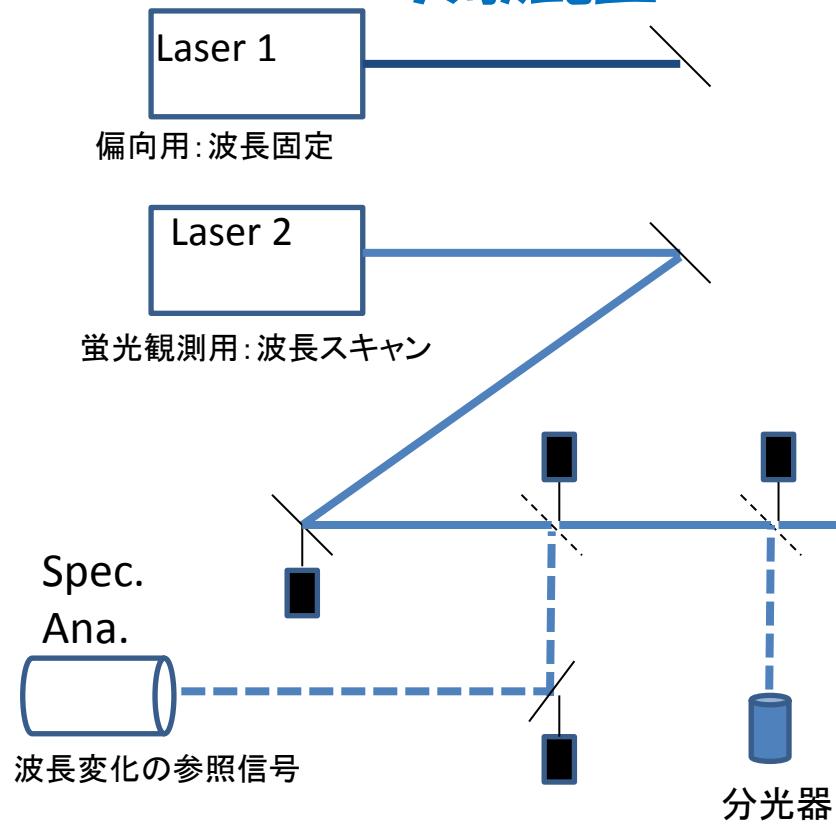
レーザー径 3cm I/I_s=1



レーザー径 5cm I/I_s=1

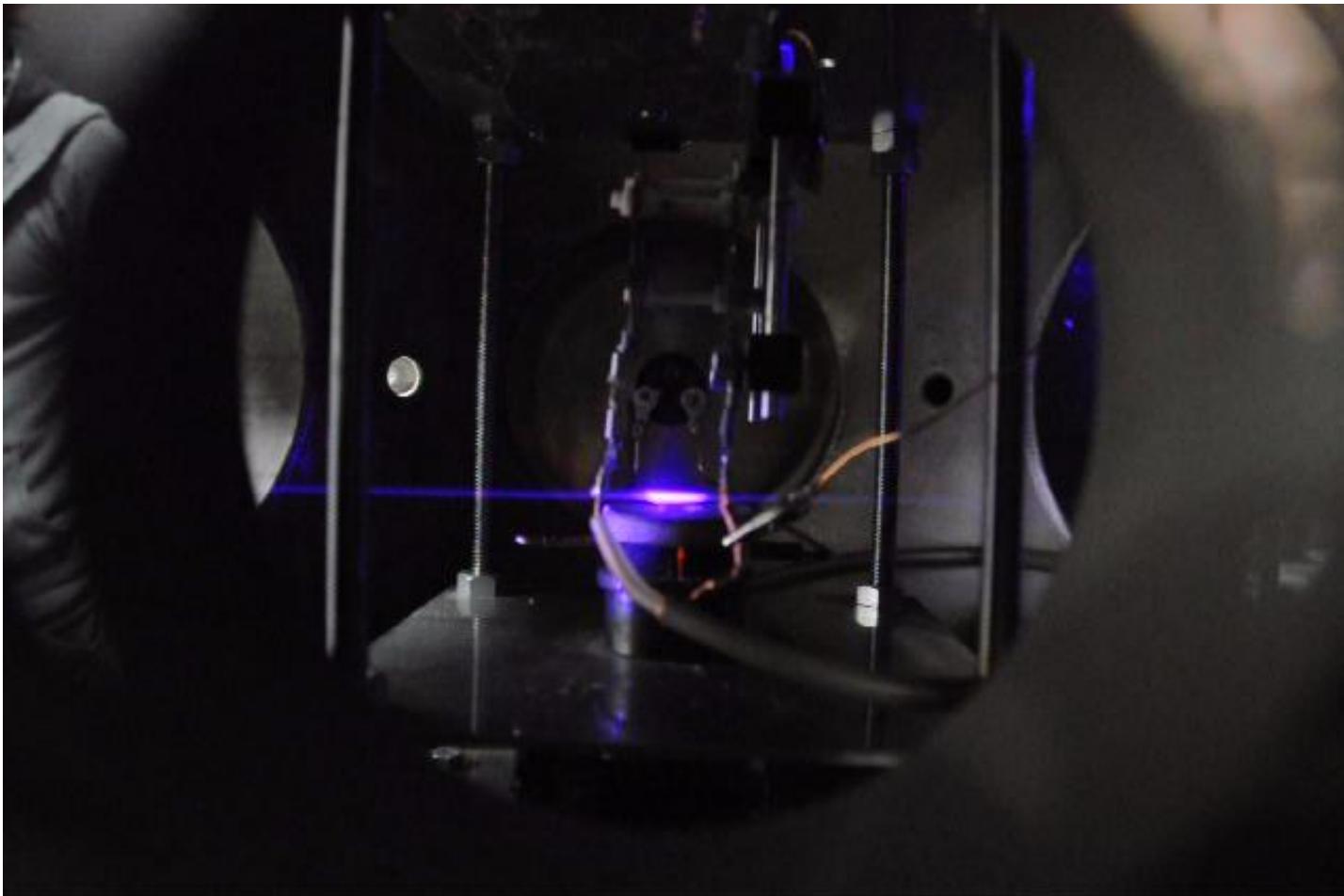


蛍光によるドップラーシフト測定 実験配置

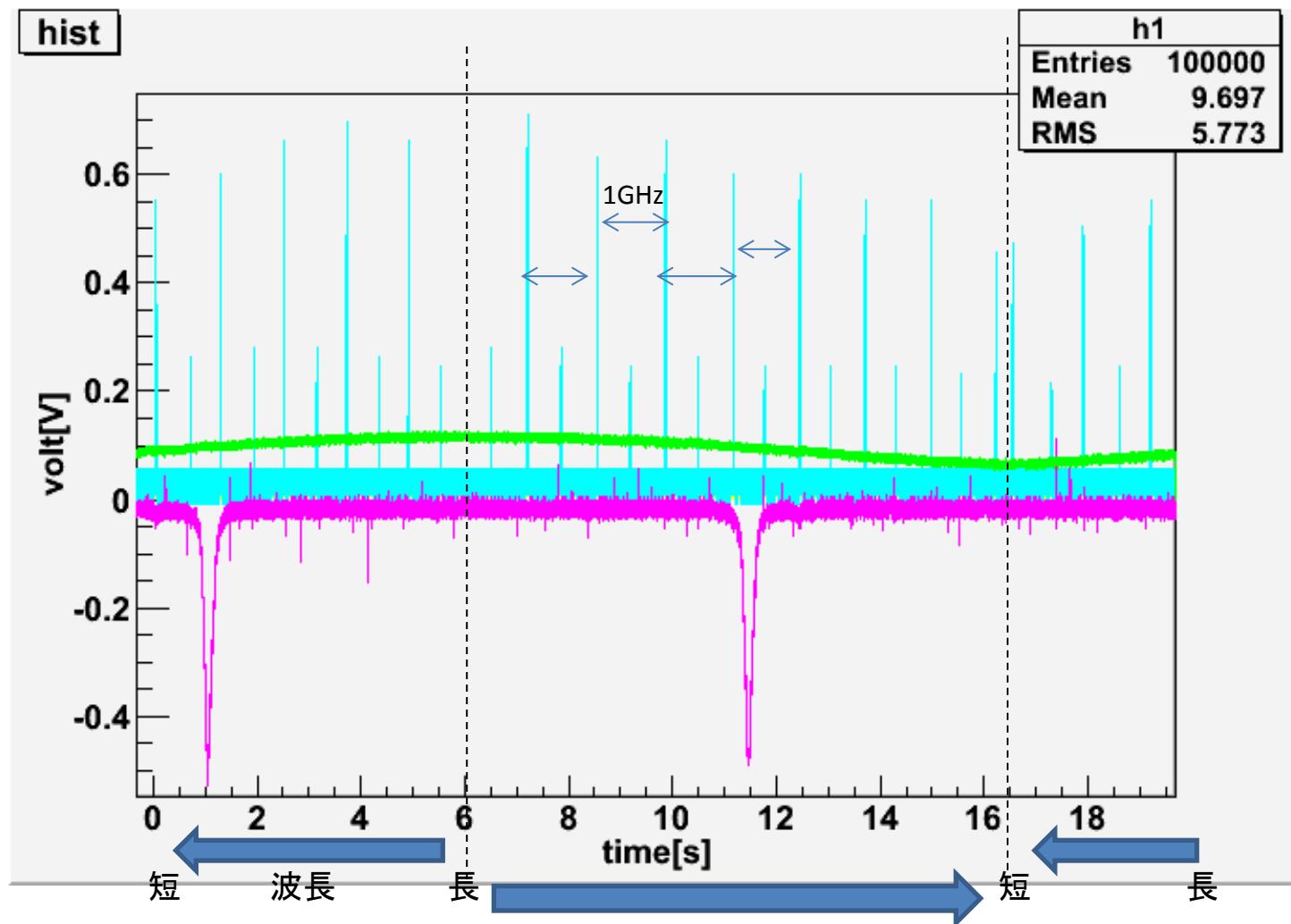


存在比の大きい⁴⁰Caの観測を試みる
レーザーによるドップラーシフト無のスペクトル測定

Laser-induced Fluorescence from Ca Vapor

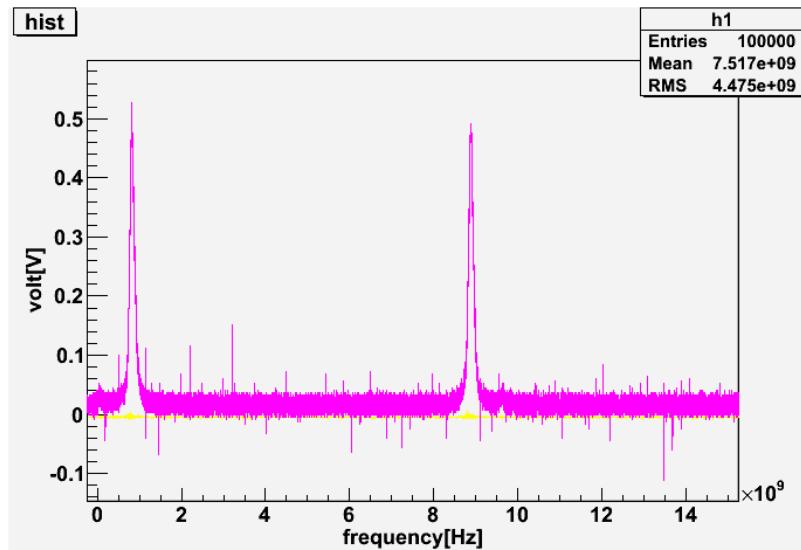


- 偏向用のレーザー(出力高い方)を蛍光観測用として使った(波長を三角波でスキャンさせて使った)ところスペクトルを得た



水色:Spec.Anal. 緑色:パワーメーター 桃色:吸収(放出)のスペクトル

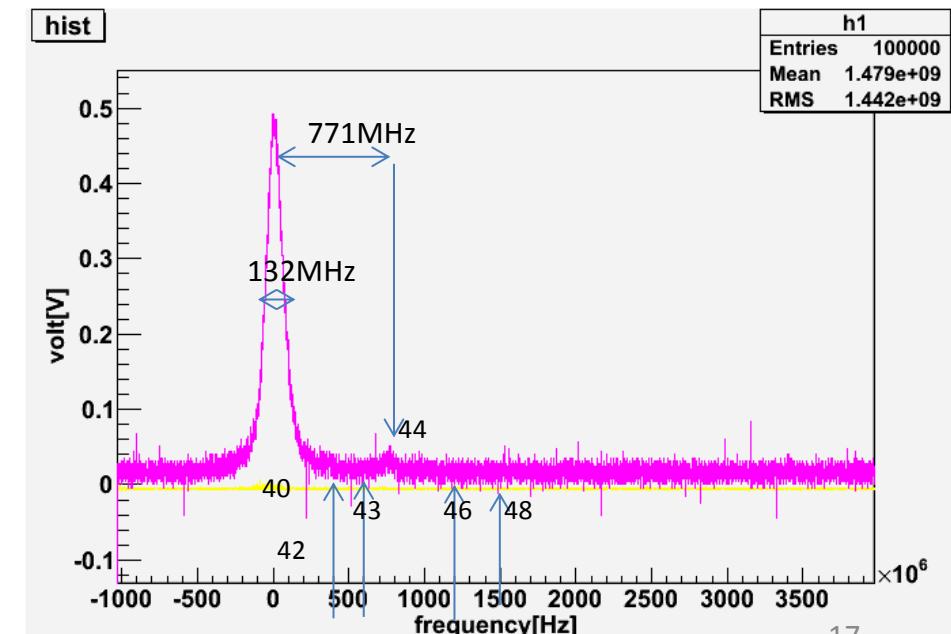
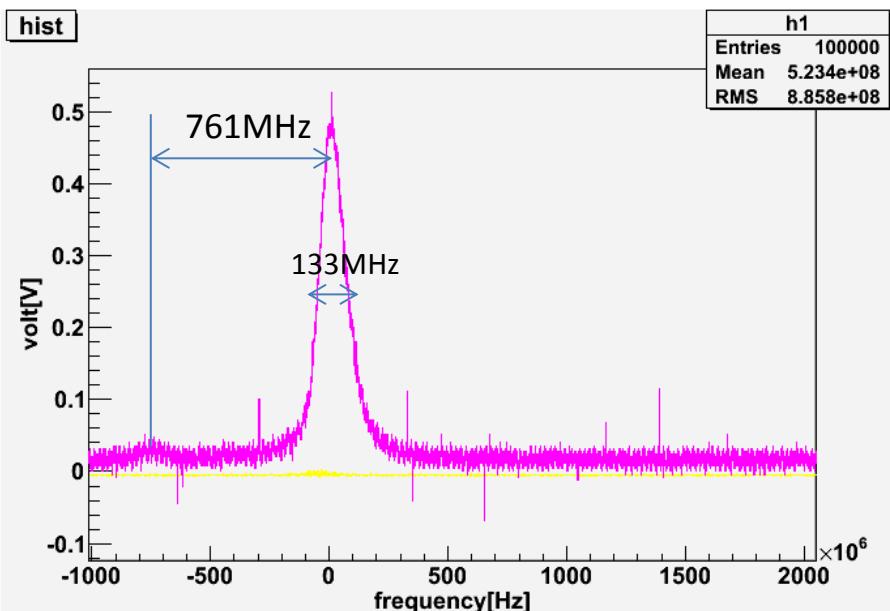
• 同位体の同定



^{40}Ca と ^{44}Ca の
同位体シフトは774MHz
→結果
約-2%の差異

- ・ ^{40}Ca のスペクトルを確認できた
- ・スペクトル幅130MHz程度

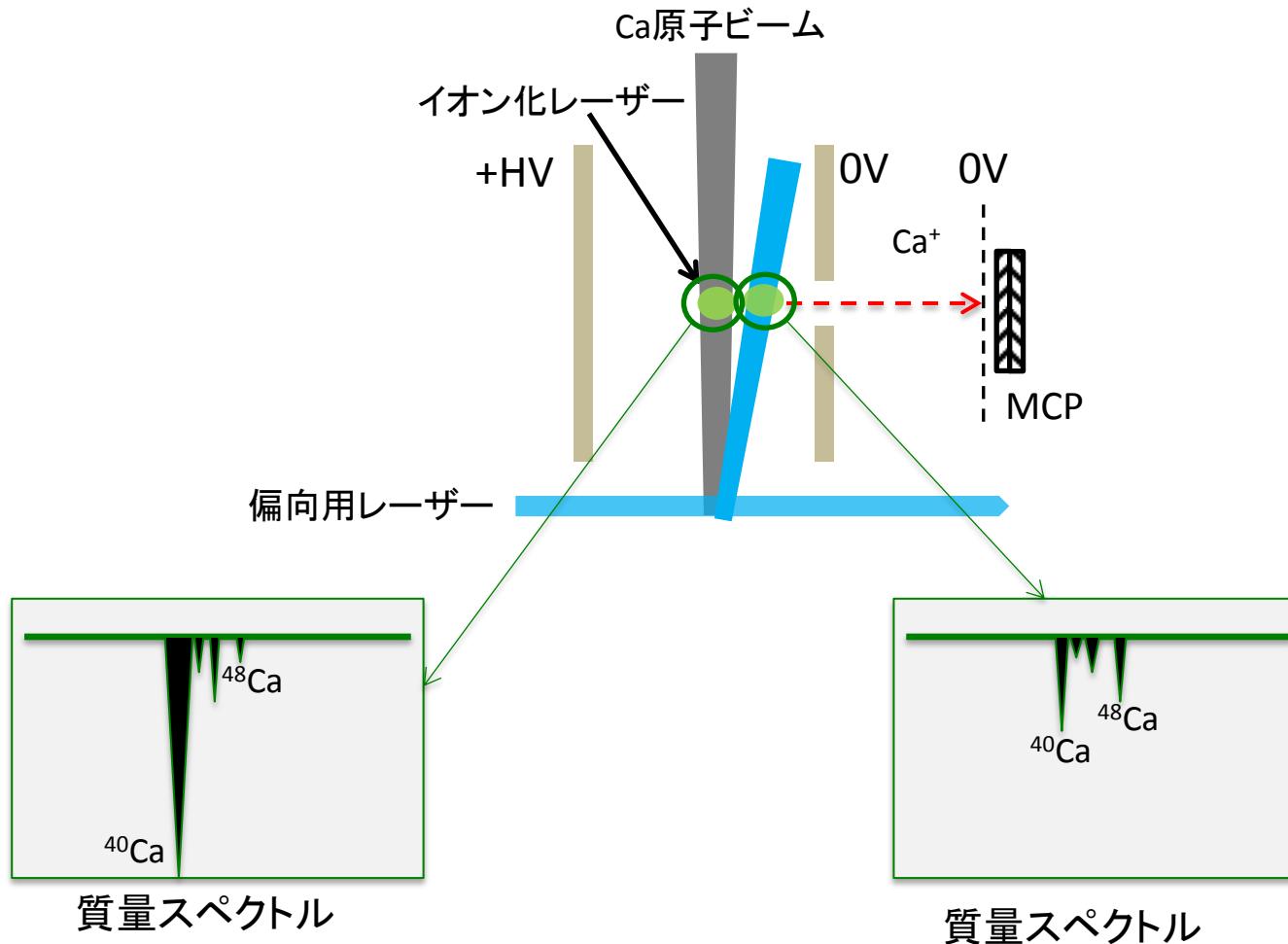
目視で明滅が確認されたため小さいスペクトルを ^{44}Ca とした



偏向原子の空間分布測定

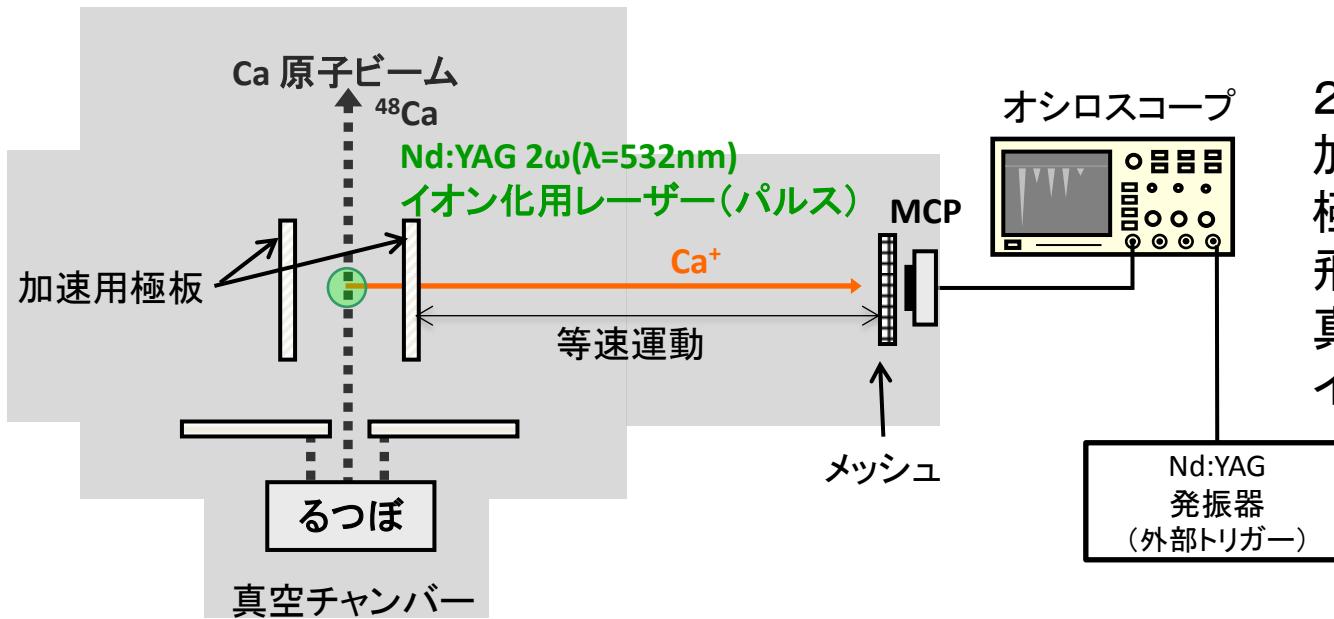
飛行時間式質量分析を用いた質量スペクトルの観測

横方向の原子密度分布または質量スペクトルの変化を測定



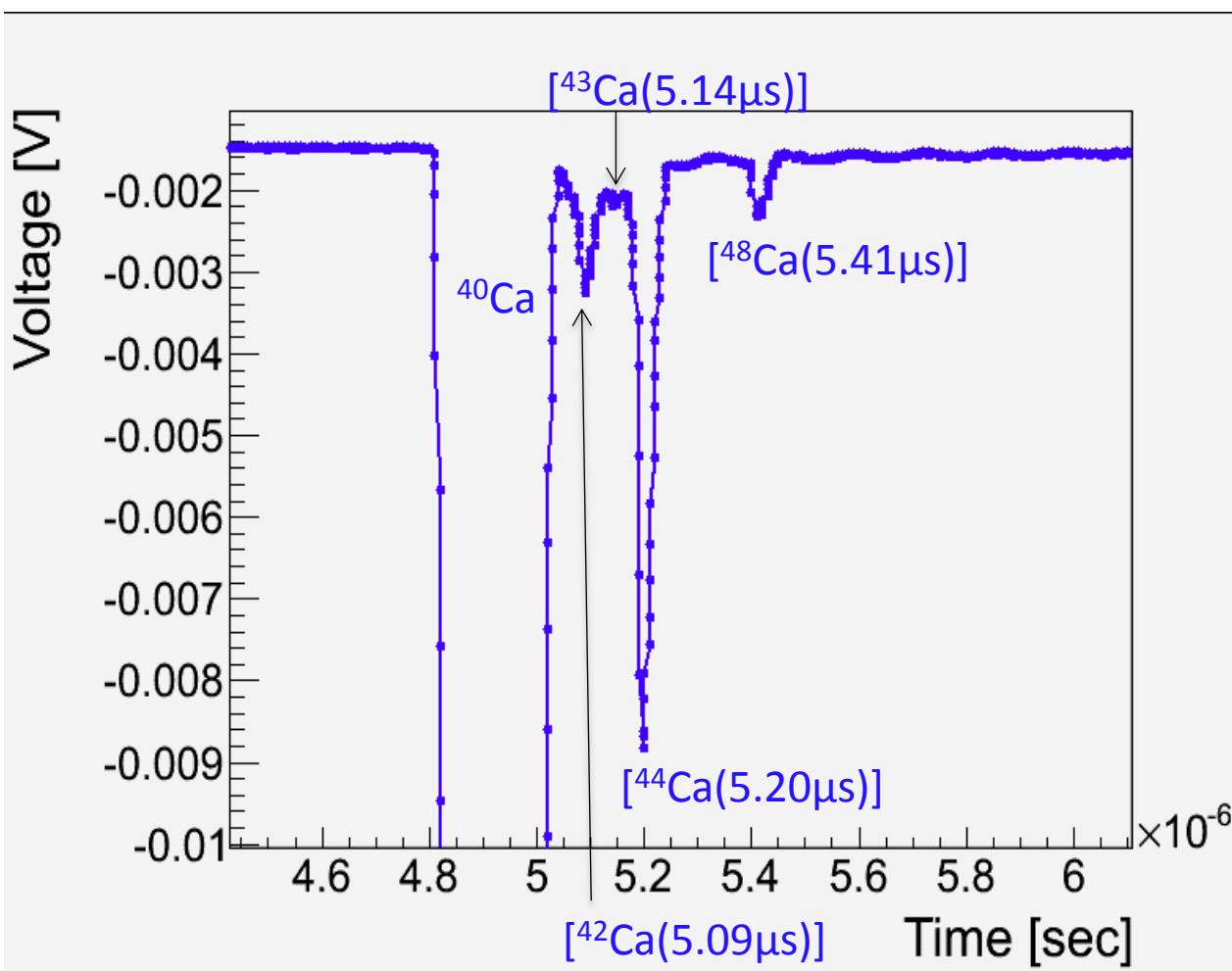
飛行時間式質量分析(TOF-MS)を用いた質量スペクトルの観測

偏向レーザーによる ^{48}Ca の分離確認、濃縮比の測定



2枚極板の一段加速
加速極板間の電圧:1000V
極板間距離:2.3cm
飛行距離:23cm
真空間度: 10^{-6}Torr
イオン化レーザー:64mJ

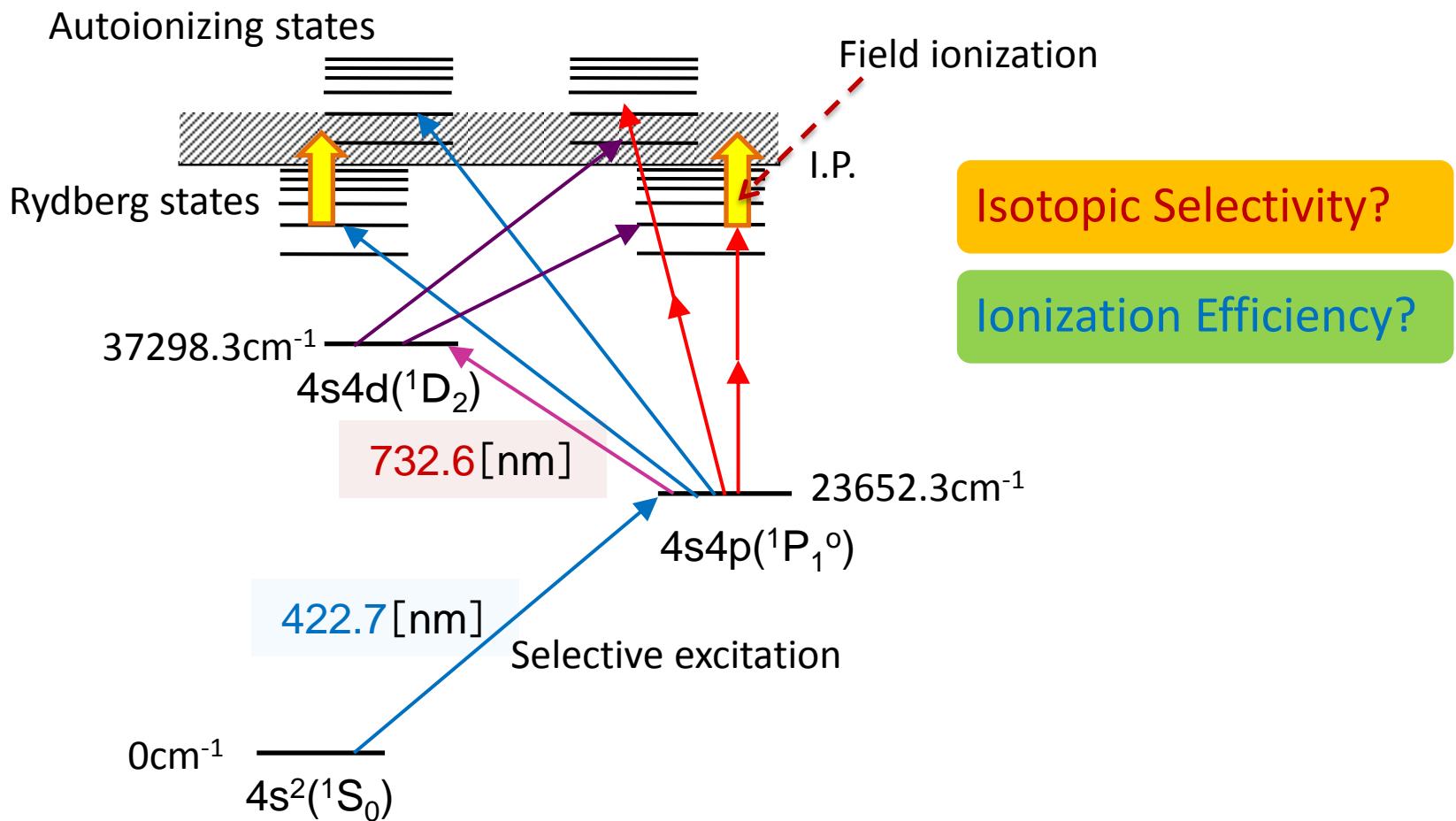
Ca質量スペクトル測定例



同位体	天然存在比 [%]
^{40}Ca	96.941
^{42}Ca	0.647
^{43}Ca	0.135
^{44}Ca	2.086
^{46}Ca	0.004
^{48}Ca	0.187

同位体	同位体比 [%]
^{42}Ca	0.574
^{43}Ca	0.134
^{44}Ca	2.086
^{48}Ca	0.229

選択的イオン化法

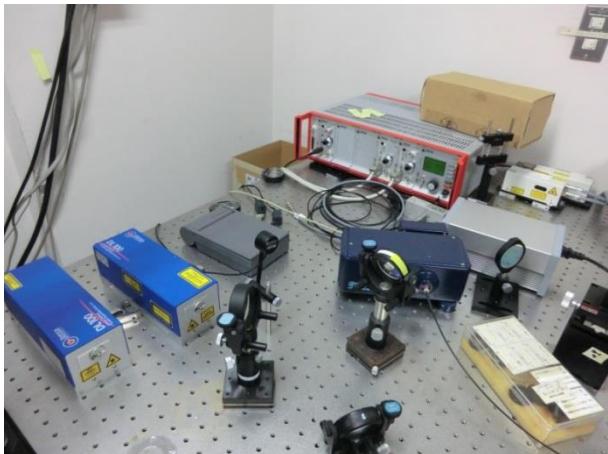


実験装置概観



小チャンバー

大チャンバー



青色レーザー

色素レーザー



内容

- ・レーザー同位体分離の原理
- ・レーザーによる偏向法について
 - *シミュレーションによる予測
 - *偏向の評価法
 - +吸収スペクトルのドップラーシフト
 - +偏向原子の空間分布測定
(質量スペクトルの空間分布測定)
- ・選択的イオン化法

1. 現在の開発状況 -プロトタイプ装置での結果-

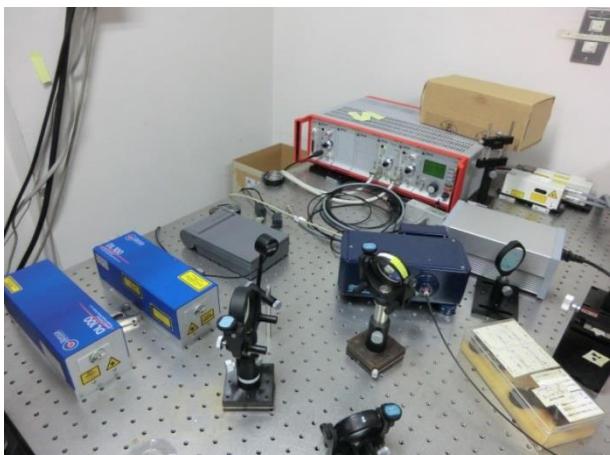
- レーザー偏向法の有用性の確認実験急ぐ
 大チャンバー>>ドップラーシフト測定: 偏向の大きさ確認
 LIFによる吸収スペクトル測定:OK. 要原子ビームコリメーション
 小チャンバー>>同位体の空間分布測定: 濃縮度の確認
 TOFによる質量分析:OK. 要イオン化効率向上
- レーザー光多重照射配置準備
- 偏向用レーザー波長の安定化
- 高効率光イオン化
- 計算シミュレーション技術
- 体制
 - 仁木・玉川・小川・学生7名

2. 今後の計画

実験装置概観と人員配置



大チャンバー
森下(M1)



青色レーザー
Irra(B4)

色素レーザー
加藤(M2)



統括

仁木、小川、玉川

計算シミュレーション

遼(M2)
Gab(B4)

フォトシコスト

^{48}Ca 1個回収するのに1000個の光子を散乱する必要があると仮定して、
1molの ^{48}Ca を回収するのにどれだけの光エネルギーが必要か？

- ・ 1光子のエネルギー：

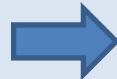
$$h\nu = h\frac{c}{\lambda} = 4.70 \times 10^{-19} [\text{J}] \\ = 2.93 [\text{eV}]$$

- ・ 1molの ^{48}Ca を回収するためには

$$4.70 \times 10^{-19} [\text{J}] \times 1000 \text{個} \\ \times 6.02 \times 10^{23} \text{個} \\ = 2.83 \times 10^8 [\text{J}]$$

- ・ 電気料金 1kWh 15円とすると

$$1 [\text{kWh}] = 10^3 [\text{W}] \times 60 \times 60 [\text{s}] \\ = 3.6 \times 10^6 [\text{J}]$$



1molの ^{48}Ca を回収するには 78.6kWh (1179円) の光エネルギーが必要

Caの蒸発速度とレーザーパワー

Caの蒸発速度

$$\begin{aligned}a_v &= 2 \times 10^{-1} kg\ m^{-2}\ s^{-1} \quad at\ T = 1112K\ (m.p.) \\&= 6.3 \times 10^6 kg\ m^{-2}\ y^{-1} \\&= 6.3 \times 10^6 kg\ m^{-2}\ y^{-1} \\&= 6,300 t m^{-2}\ y^{-1}\end{aligned}$$

Ca-48の蒸発速度に直すと $\sim 11.7 ton/m^2y$

蒸発面の面積 $10cm^2$?とするとCa-48の蒸発速度は $\sim 11.7 kg/y$

Ca-48 $11.7kg = 244mol$

必用なレーザー光エネルギー $= 2.83 \times 10^8 J \times 244 = 6.91 \times 10^{10} J$

必用なレーザー光パワー

$$= 6.91 \times 10^{10} / (60 \times 60 \times 24 \times 365) = 2.19 \times 10^3 W$$

今後の計画(近々～来年度)

1. レーザー偏向法の有用性の確認実験
急ぐ(森下M1, 寺西M2)
 - ドップラーシフト測定
 - 質量分析
2. 偏向用レーザーλロック(IrraM1)
 - F.P.スペアナまたは 波長計または other reference
3. 高効率光イオン化(新人?)
 - YAG4ω または YAG4ω 励起色素レーザー

- チャンバー・真空排気系等の改修(~1,000万円)
- ロックインアンプ(~ 100万円)
- スペアナ(~ 100万円)
or
- 波長計(~ 600万円)
- YAG 4ω 波長変換用結晶(~ 200万円)
- 色素レーザー用紫外ミラー系(~ 100万円)

今後の計画(来年度以降の要検討事項)

- 高出力レーザー光源(調査)→kW級

－半導体レーザー、中国製

－色素レーザーAmp.、その他のAmp.

- Ca原子蒸気発生

－コリメート原子蒸気ビームの発生
→るつぼ形状

－凝縮→原子蒸気密度

PD 1人

大型真空chamber一式

6,000万円

？？？

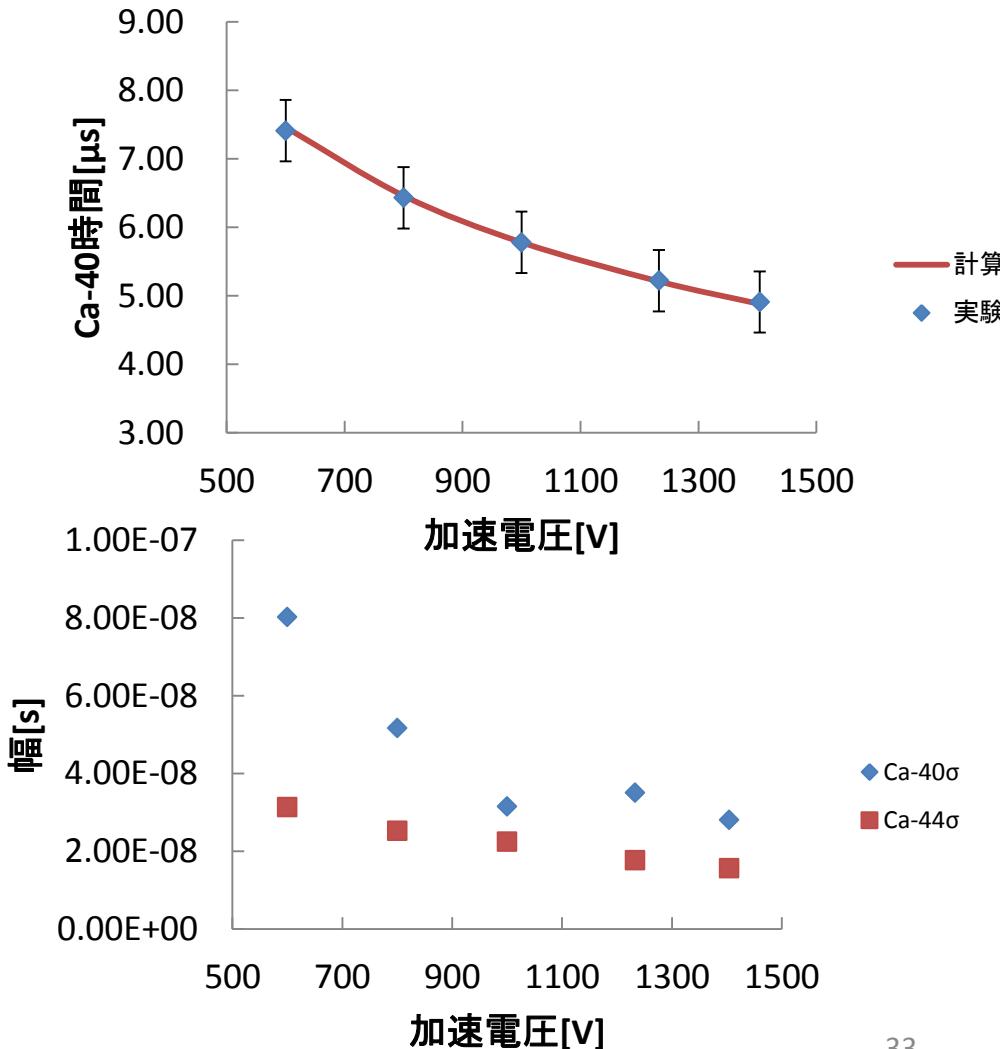
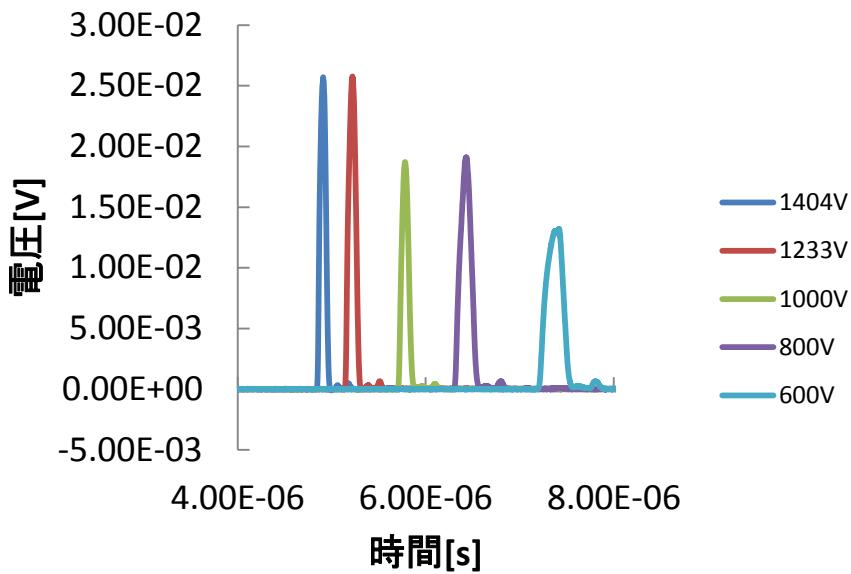
終

来年度の予定

- 目標:
 - 現在のプロトタイプ装置で濃縮⁴⁸Caの回収が可能であることを実証する
 - 各種パラメータの最適化と問題点の洗い出し
- 予算:
 - カルシウム原子
 - チェンバー改造費(コリメータ、回収機構他)
 - そのほか
- 研究体制:
 - スタッフ:仁木、玉川、小川
 - 院生:坂本、森下
 - 学部生:??

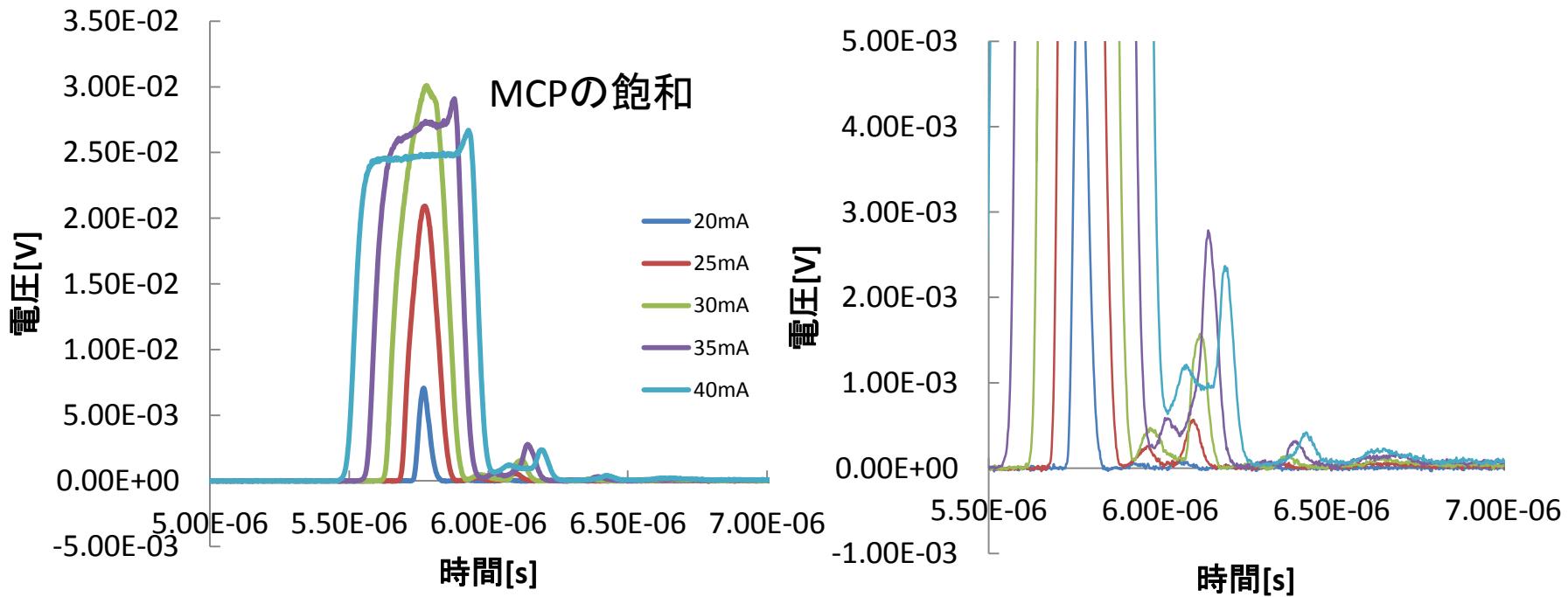
実験結果

飛行時間の加速電圧依存性

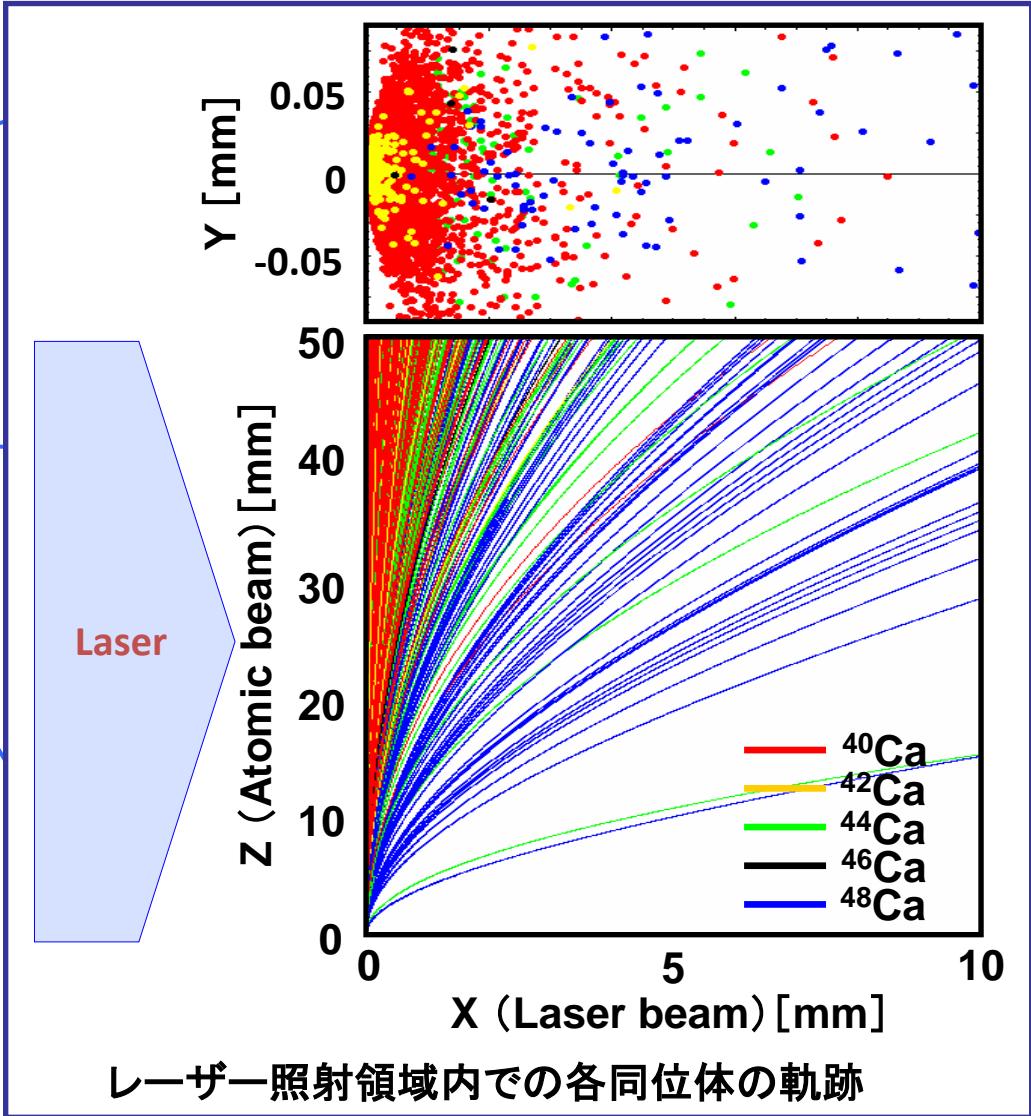
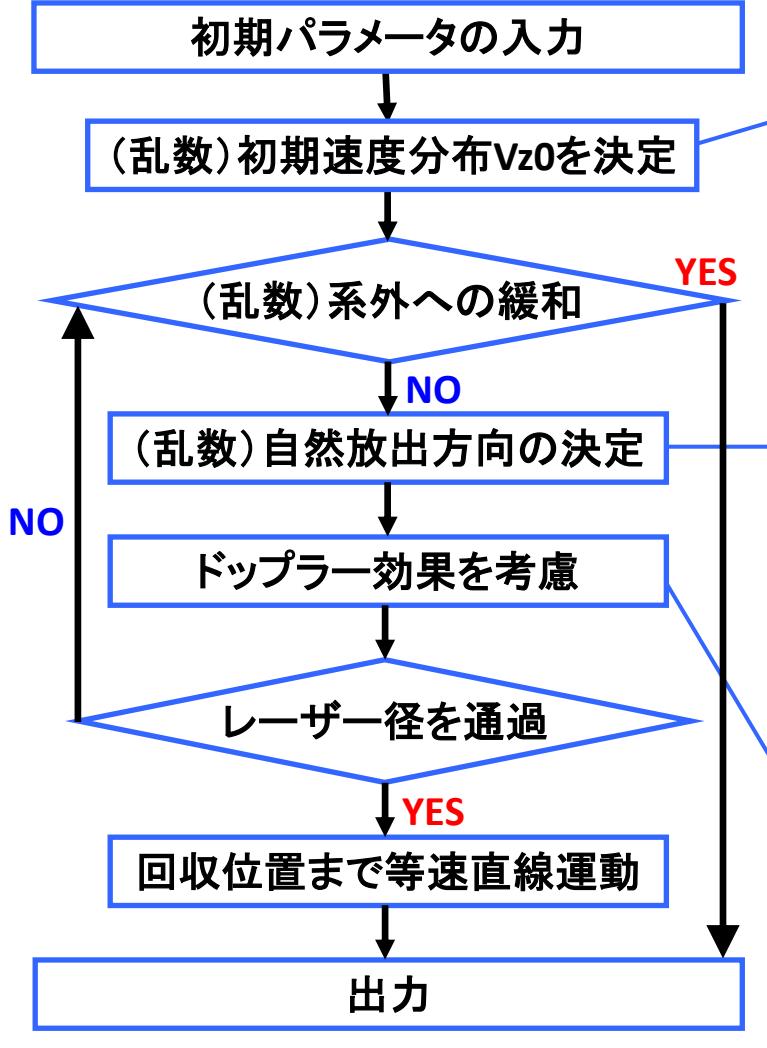


実験結果

同位体計数率の電子銃の出力に対する依存性

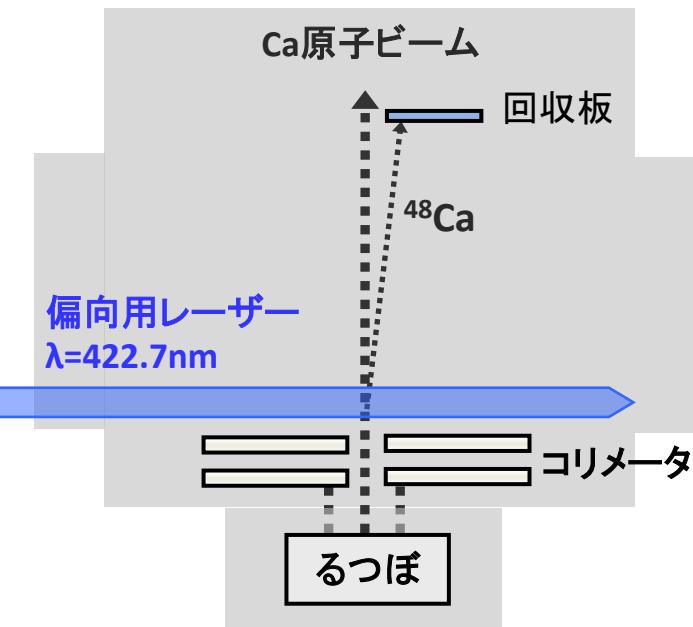


シミュレーション

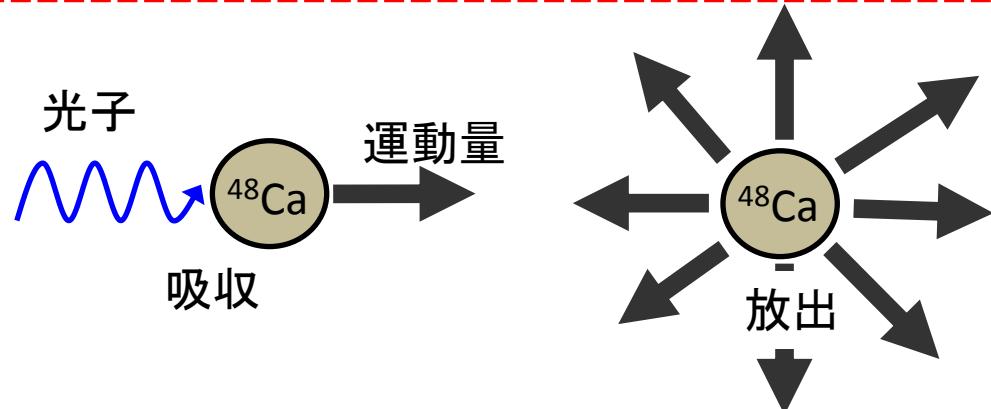


同位体分離の原理

同位体シフトを利用してレーザーで目的の同位体にのみ運動量を与える



- ^{48}Ca にのみ共鳴する波長のレーザーを照射
 - 光子を吸収する際にレーザーの進行方向に運動量を得る
- 原子ビームの軌道から逸らすことで分離する

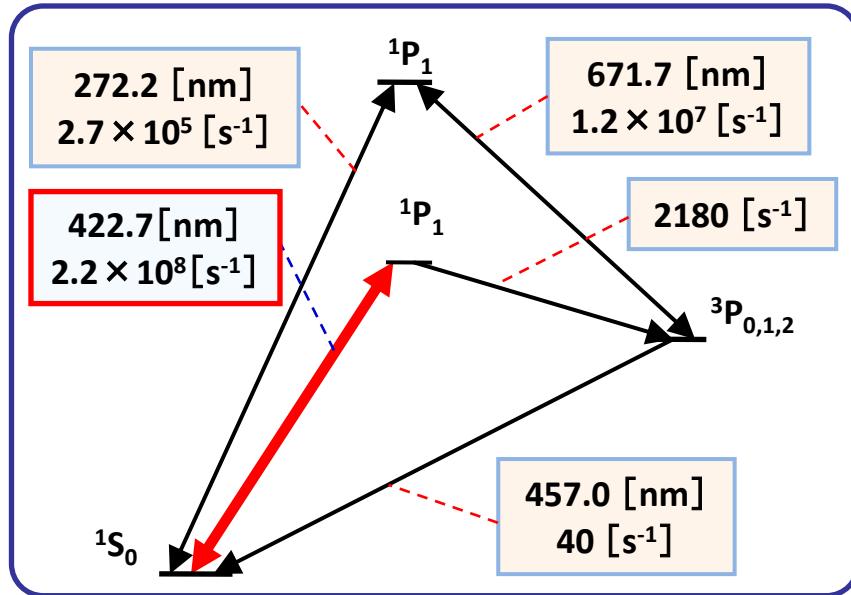


励起状態から基底状態へ戻る際の自然放出は三次元的にランダム

→ 多数の吸収・放出を繰り返すと平均的にレーザーの進行方向に運動方向を得る

エネルギー準位の遷移波長と遷移確率

この方法で軌道を逸らすには同じ遷移での吸収・放出を繰り返す必要がある



Transition : $^1P_1 - ^1S_0$
 $\lambda = 422.7 \text{ nm}$
 $\tau = 4.6 \text{ ns}$
 $\Delta\nu_{nat.} = \frac{1}{2\pi\tau} = 34 \text{ MHz (HWHM)}$
 $I_S = 59.9 \text{ mW/cm}^2$

輻射圧による分離において重要な条件

- 遷移確率が大きい
- 二準位系外への緩和を起こしにくい

→ $\lambda=422.7\text{nm}$ のレーザーを用いる

多数の吸収と放出を繰り返すことができる