

CANDLES実験のための⁴⁸Ca同位体濃縮の研究： ラビ振動を利用したレーザー偏向法効率化の検討

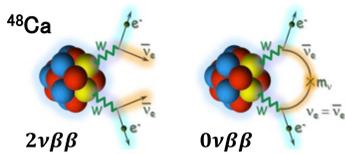
谷川 秀憲, 嶋 達志^A, 三島 賢二^A

阪大理, RCNPA^A

1. 導入

CANDLES実験

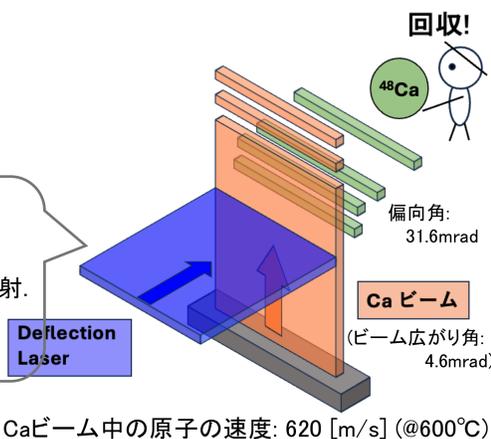
- 0νββ崩壊の探索に向けて、高い崩壊Q値(4.27MeV)を有する⁴⁸Caを崩壊核として用いている。⁴⁸Caの自然存在比は0.187%と低いため、崩壊核の増加には**同位体濃縮**が不可欠。



2. ⁴⁸Ca分離手法

レーザー偏向法

- Caの蒸気ビームを鉛直方向に発射。
- 水平方向から⁴⁸Caのみ運動量を与える波長のレーザーを照射。(422.79089 [nm])
- 偏光した⁴⁸Caを別角度で回収。



Caビーム中の原子の速度: 620 [m/s] (@600°C)

年間1トンの製造に向けて

- 1molの⁴⁸Caの製造に 2.83×10^8 [J]が必要。(1000photons/⁴⁸Ca atom)

→ 1[トン]の製造には、**5.91[TJ]のエネルギーが必要**。

(⁴⁸Caの横方向の速度: 19.6[m/s], 偏向角度: 31.6[mrad])

フォトンロス

- 一方で、1[トン]分の⁴⁸Caの運動エネルギーは、

$$\frac{1}{2} \times 1000[\text{kg}] \times (19.6[\text{m/s}])^2 = 192[\text{kJ}] \ll 6[\text{TJ}]$$

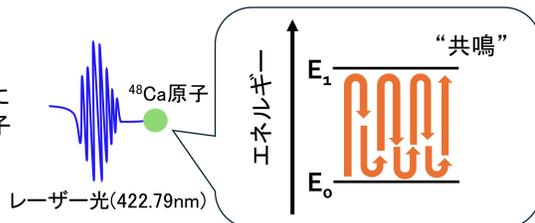
→ 励起された⁴⁸Ca原子は自然放出を起こすため、多くのレーザー光子が捨てられてしまう。

1年間で製造するには、**187.3[kW]のレーザーパワーが必要**。(100[W]レーザーが1000台以上必要)

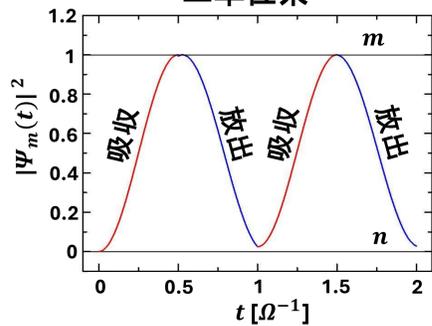
3. ラビ振動を用いた⁴⁸Ca分離手法

ラビ振動

- 2準位系に、準位間のエネルギー差に相当する周波数の光を与えると、量子状態が2準位の間を行き来する現象。



二準位系



- 光子の吸収・放出が決まったタイミングで起きる。

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

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

レーザー電場の角周波数: ω と遷移周波数: ω_{mn} が一致する($\delta = 0$)とき、

$$|\Psi_m(t)|^2 = \sin^2\left(\frac{\Omega}{2} t\right) = \frac{1 - \cos\Omega t}{2}$$

ラビ振動を用いた濃縮システム

- **⁴⁸Caの放出光子を再利用したい**。

自然放出ではなく誘導放出を用いる。

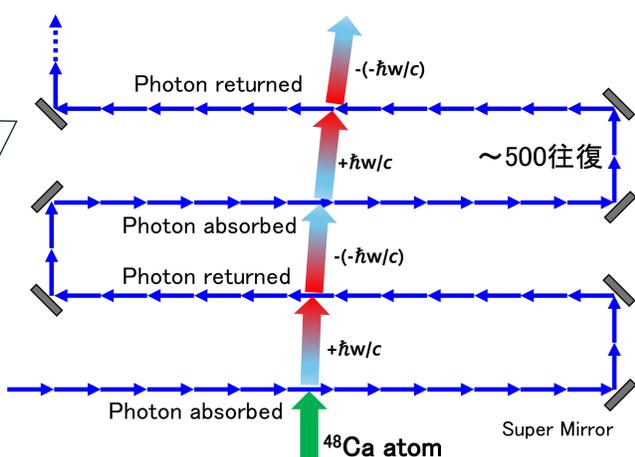
→ 脱励起光子を決まった方向に導くことができ、**放出光子を回収**できる。

- 不要な遷移(⁴⁴Ca)を抑え、目的の遷移(⁴⁸Ca)を強くする。

ラビ振動数: $\Omega = 190$ [MHz]
レーザーパワー: $P = 38.8$ [kW]が必要。

- フィネス 10^5 の光共振器を使えば、

レーザーパワー: $P = 0.388$ [W] (ピーク) ~200[mW] (平均)



4. 本研究

研究目的

- 422.7[nm]の吸収線の観測。
- ⁴⁰Caでのラビ振動の観測。

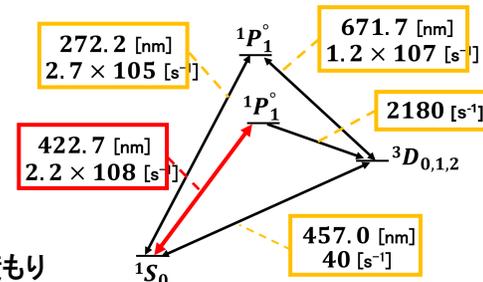
Ca温度:300°Cにおける透過光の見積もり

透過光の強度は、**0.353 I_{in}** → 入射光強度が**半分以下**になる計算。

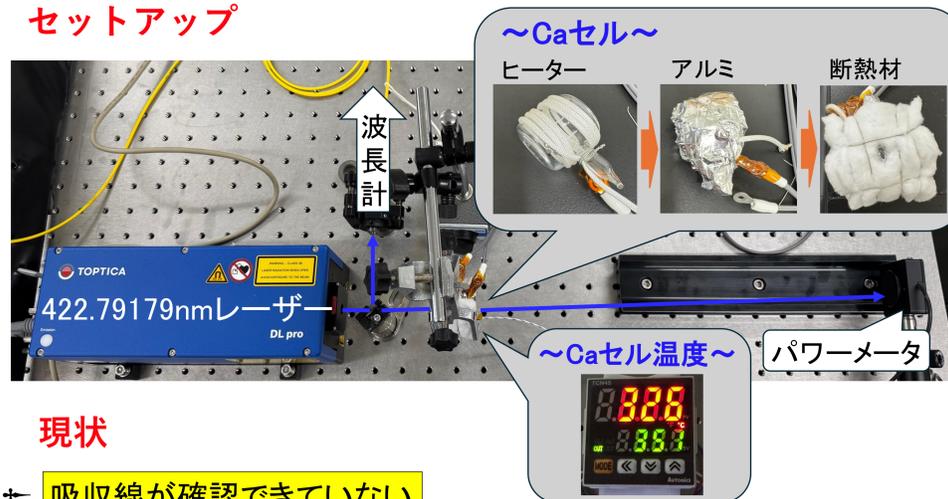
$$\text{吸収断面積: } \sigma = 6\pi \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 \frac{(1/2\tau)^2}{(\omega_0 - \omega)^2 + (1/2\tau)^2} \approx 6\pi \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 \approx 8.53 \times 10^{-10} [\text{cm}^2]$$

$$\text{蒸気圧: } P = 2 \times 10^{-6} [\text{Pa}] (@300\text{度}) \Rightarrow \text{蒸気密度: } n = 2.53 \times 10^8 [\text{atom/cm}^3]$$

$$\text{吸収確率: } p = n d \sigma = 0.647 \quad (\text{セルの長さ: } d = 3\text{cm})$$

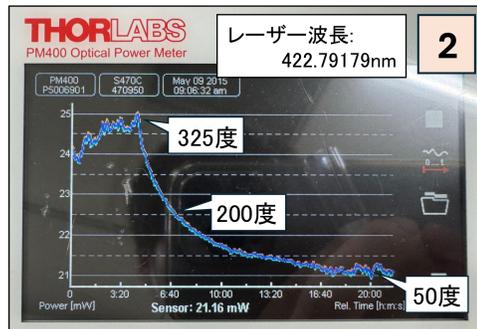
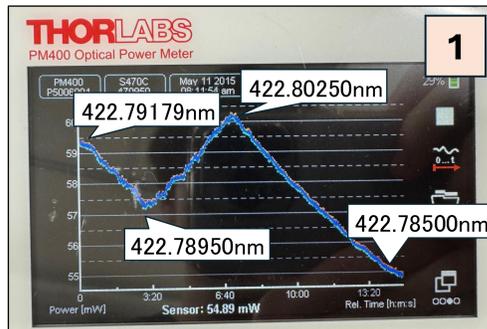


セットアップ



現状

- **吸収線が確認できていない**



- 0.00001[nm/sec]でレーザー波長をシフト。(吸収が起こった痕跡なし)

300°Cにおけるドップラー幅
 $\Delta\lambda: 0.00144$ [nm]
→ 422.79179 ± 0.00057 [nm]

- 325°C(吸収確率: 0.78) → 50°C(吸収確率: $\sim 10^{-10}$)まで自然放熱。(吸収が起こった痕跡なし)



- 使用している金属Ca純度: 99.5%

セル作成時から酸化被膜で覆われていた可能性がある??

=> 十分な量のCa蒸気が得られず、パワーメータの測定誤差(約1%)に埋もれている。

5. 今後

Caセルの作り直し

- ICF34 サファイアガラス(ビューポート) (耐熱: ~450°C)
- ICF34 クロス(フランジ)
- ICF34 ガasket 無酸素銅 (耐熱: ~450°C)
- ICF34用BOLT/NUT/WASHER 25組

素材: SUS 304 合金(鉄・クロム・ニッケル)
表面: Cr₂O₃ 不動態酸化膜



金属Caの表面は削って封入。

- 金属Caの還元剤の役割により、フランジ表面の酸化膜(Cr₂O₃)から酸素を奪う可能性がある。

→ フランジの内側をコーティング。
or 金属Caをタングステンポート(x2)で固定。

