



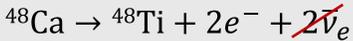
大阪大学
THE UNIVERSITY OF OSAKA

CANDLES実験に向けた⁴⁸Ca高効率濃縮のためのラビ振動原理検証

大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻 修士2年 谷川秀憲

1. CANDLES実験.

CaF₂結晶内の⁴⁸Caを用いた0νββ崩壊探索実験



(崩壊Q値: 4.27 MeV, 自然存在比: 0.187%)

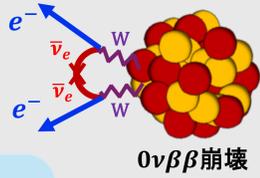


CANDLES III 検出器

CaF₂結晶 : 305 kg
⁴⁸Ca 存在比 : 0.187%
⁴⁸Ca : 350 g

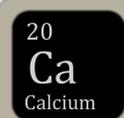
次世代検出器

CaF₂結晶 : 2 tons~
⁴⁸Ca 存在比 : 80%~
⁴⁸Ca : 数 tons



Neutrino is Majorana

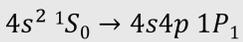
2. ⁴⁸Ca同位体濃縮.



- 常温で固体 & 揮発性化合物なし → 気体拡散法・遠心分離法 ✗
- 同位体間の共鳴波長の差あり → レーザー濃縮法(偏向法) ○ (同位体シフト)

レーザー濃縮(偏向法)

Ca代表的光学遷移



(自然放出率: $2.2 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, 寿命: 4.5 nsec)

Ca原子に一方から単一波長のレーザーを照射。
多数回の吸収・放出により、レーザー光→⁴⁸Caへ運動量移行。

従来のレーザー偏向法のデメリット

- 主に吸収過程でしか運動量移行が起こらない。
- 自然放出光がランダムな方向に放出。
・分離効率の低下・大量のエネルギー損失

共鳴吸収波長

⁴⁰Ca: 422.79179 nm
⁴⁴Ca: 422.79133 nm
⁴⁸Ca: 422.79089 nm



3. 誘導放出を利用したレーザー濃縮法.

誘導放出を利用したレーザー偏向法

- 吸収過程と放出過程を狙ってレーザーを反対方向に照射。
- 放出過程では誘導放出を利用。

新手法のメリット

- 放出光子は誘導光と同じ波数ベクトル
・放出光子の回収 & 再利用可能。
・放出過程でも運動量移行が起こる。

ラビ振動

励起確率が時間周期性をもって変動する現象。

二準位系における励起確率:

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

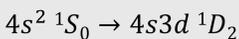
(ラビ振動数: $\Omega \equiv \frac{\mu_{mn} E_0}{\hbar}$, 離調: $\delta \equiv \omega - \omega_{mn}$)

研究目的

ドップラーシフト・自然放出の影響を調査
Ca atomic beamsを用いたラビ振動の観測。

4. ラビ振動観測手法の検討.

ラビ駆動における準位選択



(457.7nm遷移)

(自然放出率: 40 s^{-1} , 寿命: 25 msec)

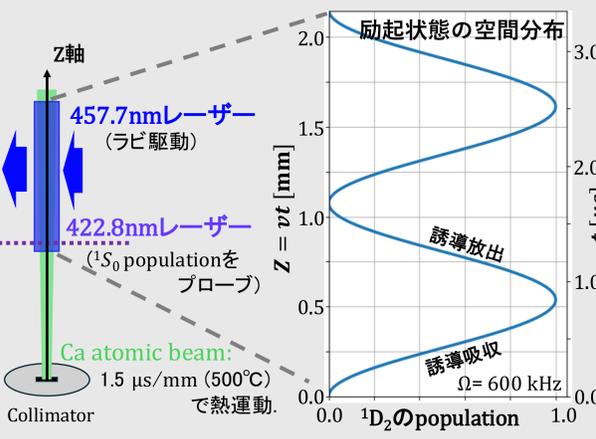
自然放出による減衰が無視可能。

励起状態の空間分布は複数の要因によって崩れ得る。

数値計算上の設定値

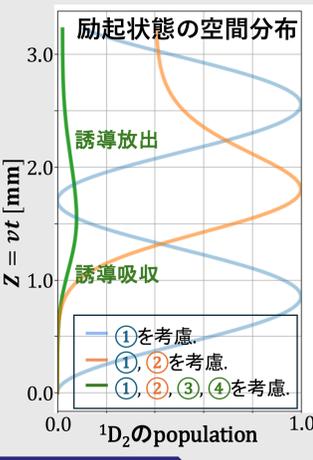
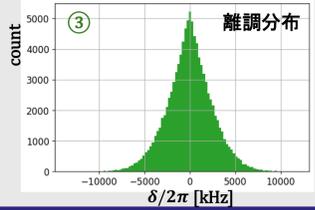
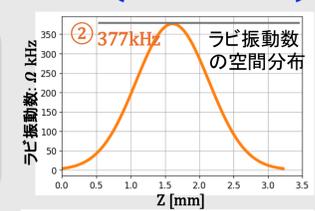
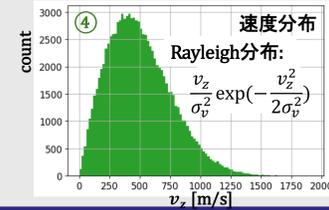
- レーザーパワーP: 180 mW
- 1/e²直径(長辺): 1.5 mm = 2w_z
- 1/e²直径(短辺): 0.5 mm = 2w_y
- Ca原子ビームの最大発散角: 3.5 mrad

数値計算によって測定手法の有効性を確かめる。



モンテカルロ法による数値計算 (N=100,000)

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



5. Ca atomic beamの作製.

Ca蒸気生成.

真空下で金属Caをるつぼにて500°Cで加熱。

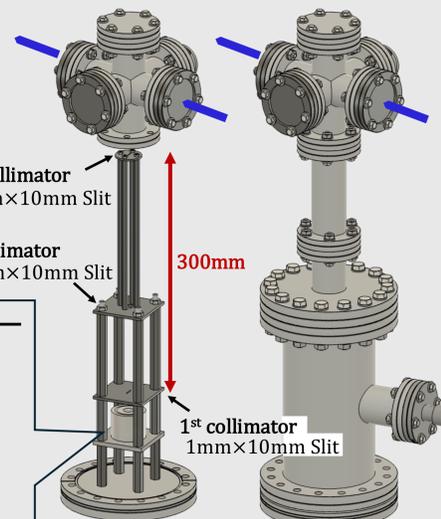
コリメータ設計.

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)

数値計算の要件(3.5 mrad)を満足。

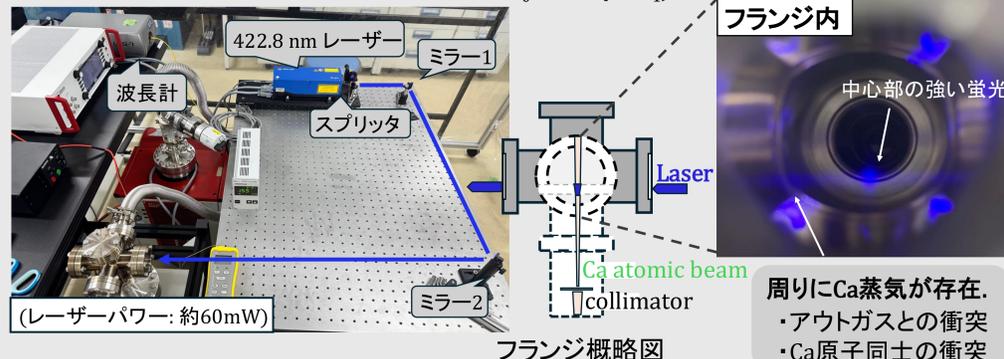


6. Ca atomic beamの発散評価.

Ca atomic beamの発散を評価するため、ドップラーシフトの測定を行なった。

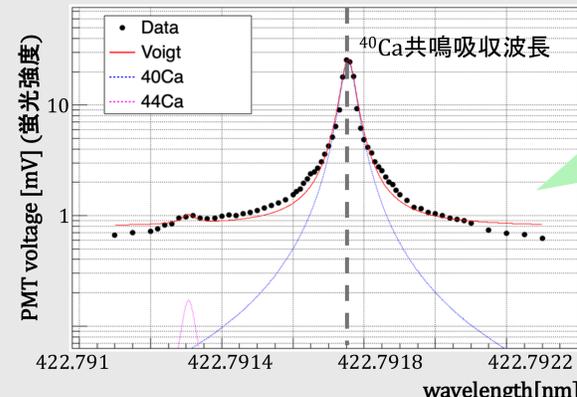
実験セットアップ

(蛍光観測遷移: $4s^2 \ ^1S_0 \rightarrow 4s4p \ ^1P_1$)



コリメータが機能する中心部のbeam発散の評価が必要。

レーザーを波長掃引した際の蛍光強度の変化をPMTで測定。



Fitting Function: Voigt

$$V(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\nu') L(\nu - \nu') d\nu'$$

(G(ν): Gaussian, L(ν): Lorentzian)

コリメータの幾何から計算されるドップラーシフトσ_{coll}: 1.46 MHz.

$$\sigma_{fit} \approx \sigma_{coll}$$

コリメータの機能性を確認。

	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

ラビ振動の観測に向けて、Ca atomic beamの発散が抑制されていることを確認。

7. まとめと展望.

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)

本研究のまとめ

- ラビ振動の観測方法を確立。
- Ca原子ビームの作製完了。(シリンドリカルレンズを用いてレーザーサイズの調整完了。)

今後の展望

- 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。