

準安定状態アルゴン原子(Ar^*) のレーザー冷却・トラップの研究 その1

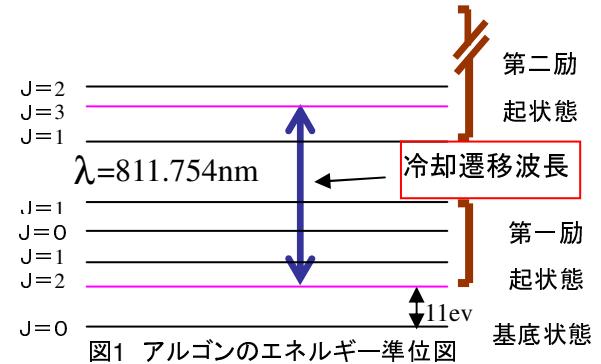
量子物質工学科 0213048 清水 政志

[目的]

準安定状態アルゴン原子を半導体レーザーを用いて冷却し、磁気光学トラップ(MOT)を作成することを目的とする。

[方法] 1, レーザー冷却

原子に共鳴周波数のレーザーを入射すると、原子は光子を吸収し励起状態に励起される。この後原子は光子を自然放出し基底状態に戻る。このとき原子は光子を吸収する際に一定方向(レーザーの入射方向)の運動量を受け取り続けるが、放出する際には等方的に放出され、運動量変化の平均は0になる。この吸収・放出サイクルを繰り返すことにより原子は減速されてゆく。右にアルゴンの準位図と今回用いる冷却遷移波長を示す。



2, ゼーマン同調法

原子の進行方向に対向してレーザーを入射したとき、レーザー周波数を v_L 、原子の速度 V とするとドップラー効果により原子は $\delta v_{\text{dop}} = (v / c) v_L \dots (1)$ だけ周波数を高く感じる。(ドップラーシフト)つまり原子は $v_L + \delta v_{\text{dop}}$ の周波数を感じる。すなわち原子は減速するに従い、原子が感じるレーザー周波数が変わってしまう。この問題を解決するためにレーザー周波数を固定したまま、ゼーマンコイルで位置によって変化する磁場を発生させ、そのときのゼーマンシフトによってドップラーシフトを補償するゼーマン同調法を用いる。

2.1 ゼーマンシフト

今回用いる冷却遷移間では磁気量子数は $m_1 = 2, m_2 = 3$ 、ランデのg ファクターは $g_1 = 3/2, g_2 = 4/3$ であるのでゼーマンシフトは次式で与えられる。ここで μ_B はボーラ磁子、 $B(z')$ は位置 z' における磁場である。

$$\delta v_{\text{zeeman}} = \frac{(m_2 g_2 - m_1 g_1) \mu_B B(z')}{h} \dots (2)$$

2.2 ゼーマンコイル内の磁場分布

ゼーマンコイル内において原子の初速を v_0 とし、一定の減速度 α で減速させていく場合、原子の速度は場所の関数として

$$v(z') = \sqrt{1 - \frac{2\alpha z'}{v_0^2}} \dots (3)$$

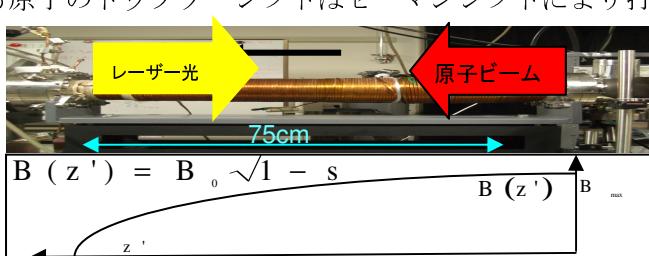
と表せる。そして磁場の空間分布が

$$B(z') = B_{\text{max}} \sqrt{1 - s} \quad s = 2\alpha z' / v_0^2 \dots (4)$$

であればゼーマンコイル中を進んで減速される原子のドップラーシフトはゼーマンシフトにより打ち消され、常にレーザー光を吸収することができる。

図2 ゼーマンコイル

図3ゼーマンコイル内の磁場分布



2.3 ゼーマン冷却に関する諸特性

2.3.1. 捕捉できる速度 (初速度 v_0)

捕捉できる速度は最大磁場 B_{\max} のときのゼーマンシフトによって補償できる速度であるので、

$$\delta v_{\text{zeemana}} \quad (\text{B} = B_{\max}) = \delta v_{\text{dop}} \quad (\text{v} = v_0) \quad \text{より}$$

$$v_0 = (c / v_0) \delta v_{\text{zeemana}} \quad (\text{B} = B_{\max}) \quad \dots(5) \quad \text{となる。}$$

2.3.2. ゼーマンコイル中の原子の速度 v

原子の速度 v は減速度をアルゴンの最大減速度 a_{\max} を用いて次式で表せる。

$$v(z') = (v_0^2 - 2a_{\max}z')^{1/2} \quad \dots(6) \quad (z'; \text{最大磁場の位置からの距離})$$

また最大減速度は $a_{\max} = h\nu/2mc\tau_s = 2.28 \times 10^5 [\text{m/s}^2]$

(m ; Ar*の質量 $6.63 \times 10^{-26} [\text{kg}]$ 、 τ_s ; 原子の寿命 $27 [\text{ns}]$ 、 c ; 真空中の光速) である。

2.3.3. 磁場勾配の限界

原子がゼーマンコイル内で共鳴から外れることなく冷却が続くためには磁場勾配がある限界値を超えてはならない。(式 (7))

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dB} \cdot \frac{dB}{dz} \cdot v \leq \frac{a_{\max}}{\lambda} \quad \dots(7)$$

Ar*の場合この式に $\frac{dv}{dB} = \frac{(m_2g_2 - m_1g_1)\mu_B}{h} = 1.4 \times 10^6 [\text{Hz/G}]$, a_{\max} , λ を代入すると

$$\frac{dB}{dz} \leq 2.0 \times 10^5 \cdot \frac{1}{v} \quad \dots(8) \text{となる。}$$

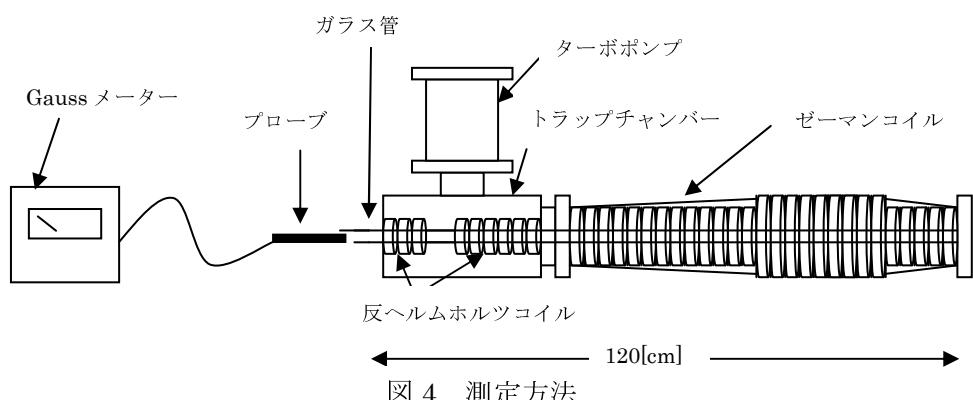
そして速度 $v(z')$ が

$$v(z') \leq v_{\max} = 2.0 \times 10^5 \cdot \frac{1}{\left(\frac{dB}{dz}\right)_{\max}} \quad \dots(9)$$

となっていれば共鳴から外れることなく冷却は続く。

[実験 1]

トラップ・冷却するためには①トラップ中心の磁場勾配が $15[\text{G/cm}]$ 程度であること。② B_{\max} を大きくして捕捉できる速度を大きくすること。③ゼーマンコイルの磁場勾配が限界値を超えないようにすること。が必要である。そのことを調べるためにいくつかの電流においてトラップチャンバー-ゼーマンコイル内の磁場分布を測定、計算を行った。測定は下の図 4 のようにトラップチャンバー-ゼーマンコイルにガラス管を通して、その中に軸方向を測れるプローブを用いて行った。コイルにかける電流を図 4 の左のコイル (反ヘルムホルツコイル左) から (15A, 7A, 3A), (15A, 7A, 5A) の 2通りについて行った。



1.結果

測定した磁場分布を図 5,6 に示す。

1.1,反ヘルムホルツコイル左;15A、

反ヘルムホルツコイル右;7A、

ゼーマンコイル;3A

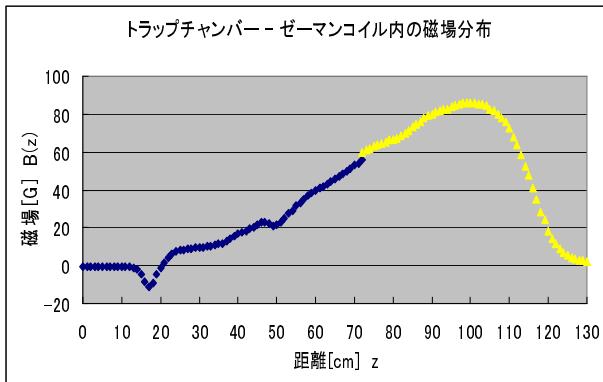


図 5

トラップ位置での磁場勾配(z=20) 3.1[G/cm]

ゼーマンコイル内の最大磁場(z=100) 85.9[G]

ゼーマンコイル内の最大磁場勾配(z=50~60) 1.9[G/cm]

1.2 反ヘルムホルツコイル左;15A

反ヘルムホルツコイル右;7A、

ゼーマンコイル;5A

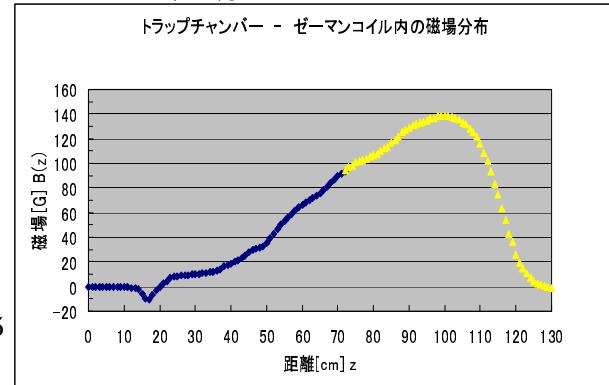


図 6

トラップ位置での磁場勾配(z=20) 2.9[G/cm]

ゼーマンコイル内の最大磁場(z=100) 138[G]

ゼーマンコイル内の最大磁場勾配(z=48~58) 3.3[G/cm]

2.計算

上の結果よりトラップ位置での磁場勾配は 3[G/cm]程度である。実際は 15[G/cm]程度必要なので反ヘルムホルツコイルにかける電流は今回の実験の 5 倍程度かける必要がある。そこでゼーマンコイルかける電流において 5 倍したとき、捕捉できる速度の値、また磁場勾配が限界を超えていないかを計算した。

2.1 ゼーマンコイル;15A(3AX5)のとき

ゼーマンコイルの 最大磁場[G]	ゼーマンコイルの 最大磁場勾配[G/cm]	ゼーマンシフト[MHz]	捕捉できる速度[m/s]
430	9.5	600	489

表 1

・磁場勾配の限界($z' = 46$ とする)

$$v_{\max} = 2.0 \times 10^5 / \left(\frac{dB}{dz} \right)_{\max} = 211 \text{ [m/s]}$$

$$v(z') = (v_0^2 - 2a_{\max}z')^{1/2} = 171 \text{ [m/s]}$$

より $v_{\max} \geq v(z')$ となり

489[m/s]以下の速度の原子を冷却でき、磁場勾配も限界を超えていないので共鳴から外れることなく冷却される。

2.2 ゼーマンコイル;25A(5AX5)のとき

ゼーマンコイルの 最大磁場[G]	ゼーマンコイルの 最大磁場勾配[G/cm]	ゼーマンシフト[MHz]	捕捉できる速度[m/s]
690	16.6	966	784

表 2

・磁場勾配の限界($z' = 46$ とする)

$$v_{\max} = 2.0 \times 10^5 / \left(\frac{dB}{dz} \right)_{\max} = 120 \text{ [m/s]}$$

$$v(z') = (v_0^2 - 2a_{\max}z')^{\frac{1}{2}} = 636 \text{ [m/s]} \quad \text{より } v_{\max} \leq v(z') \text{ となり}$$

784[m/s]以下の速度の原子を共鳴させることはできるが、磁場勾配の限界を超てしまっているので共鳴から外れ、冷却が止まってしまう。

[実験 2]

放電管から放出された直後の準安定アルゴン原子の原子ビームの最確速度を測定した。測定は図7のようにピンホールから飛び出した原子ビームにレーザー光を入射させた。このときレーザー周波数 ν_L を原子の共鳴周波数 ν_0 から $0 \sim 1000$ [MHz] 变化させ、最も原子が共鳴するレーザー周波数を調べた。



図7 測定方法

・結果

図8のように最も原子が共鳴したのはレーザー周波数が $\nu_0 - 750 \sim 800$ [MHz] のときであった。

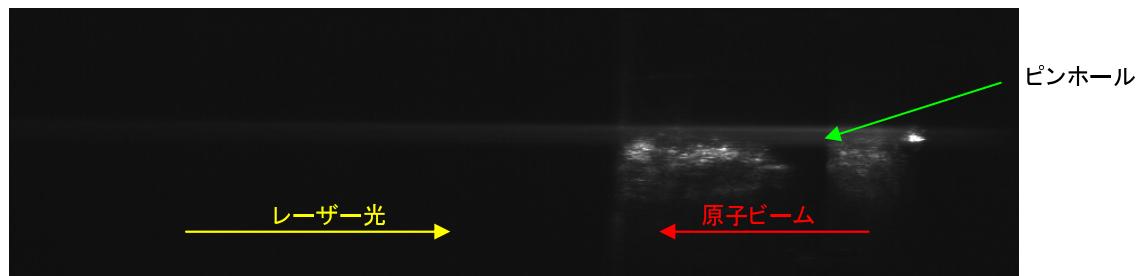


図8 原子の共鳴

したがって最確速度 $v_{\text{最確}}$ は $\delta\nu_{\text{dop}} = (v_{\text{最確}} / c) \nu_0 = 750 \sim 800$ [MHz] より
 $v_{\text{最確}} = 609 \sim 650$ [m/s] であることがわかった。

[まとめ]

- 反ヘルムホルツコイル(左、右)、ゼーマンコイルに(75A,35A,15A)の電流を流すことによりトラップの位置ではトラップに必要な磁場勾配(15[G/cm]程度)が得られ、またゼーマンコイル内で共鳴から外れることなく 489[m/s]以下の速度の原子を冷却できることがわかった。
- 放電管から放出された直後の準安定状態アルゴン原子の原子ビームの最確速度は 609~650[m/s]であることがわかった。