

# 原子干渉計に用いる冷却原子源の温度評価

中川研究室 吉田 佑策

## 1 背景と目的

原子干渉計は、重力加速度をはじめ超微細構造定数や原子の誘電率などの定数の、高精度な測定への応用が期待されている。原子干渉計の研究はレーザーの性能の高精度化に伴って、レーザー冷却の技術が発展したことに起因する。中川研究室では重力加速度の測定をするために<sup>87</sup>Rb原子を用いた原子干渉計の開発を行っている。原子干渉計には原子の波動性が顕著に表れ、原子がよく干渉する必要があり、そのためには原子にレーザー冷却を行い、数百 nK まで冷却することが必要になる。磁気光学トラップ、偏光勾配冷却を用いて原子を冷却する機構が完成したため、本研究ではその機構によってどの程度まで原子が冷却されているのかを評価することを目的とし、Time Of Flight 法を基に冷却原子の温度を測定した。

## 2 原理

### 2.1 原子の冷却

原子の冷却方法には磁気光学トラップ (MOT) と偏光勾配冷却を用いた。以降この2つの冷却方法について述べる。また簡便化のために二準位原子について考えるものとする。

### 2.1 磁気光学トラップ (MOT)

磁気光学トラップ (以下 MOT) では図1のようにレーザー光 (周波数 $\omega$ , 波数 $k$ ) を  $x, y, z$  軸から対向させて照射することで原子を冷却し、アンチヘルムホルツコイル対から発生する四重極磁場によって原子を1箇所にも捕獲することができる。レーザーによる冷却はドップラー冷却によるものである。簡便化のため1次元で  $x$  軸方向のみ考え、原子の速さを $v$ とする。レーザー光の周波数 $\omega$ を、原子の共鳴周波数 $\omega_0$ より小さい ( $\omega < \omega_0$ ) 赤方離調として対向させて照射すると、ドップラー効果により原子の感じるレーザー光の周波数が変化する。原子が感じる周波数は、速度と同じ方向に伝搬するレーザー光の場合は $\omega - kv$ , 速度と逆方向に伝搬するレーザー光の場合は $\omega + kv$ となる。つまり、ドップラー効果によって速度と同じ方向に伝搬するレーザー光の周波数は共鳴周波数から遠ざかり、速度と逆方向に伝搬するレーザー光の周波数は共鳴周波数に近づく。図2は周波数に対する原子の吸収の強さを示しており、原子は共鳴周波数に近い、速度と逆方向に伝搬するレーザー光の方が強く吸収される。これにより原子が吸収の際に生じる力、輻射圧は速度と逆向きの方が大きくなり、原子は速度と逆向きに力を受け減速、すなわち冷却が成される。原子が受ける力がこの輻射圧だけであれば原子はやがて静止するが、実際には励起状態から自然放出の際にランダムな方向へ運動量を放出し加熱もされる。冷却と加熱のレートが等しくなった時がこのドップラー冷却の限界であり、到達可能な最低温度、ドップラー温度は、<sup>87</sup>Rb原子の場合およそ  $147 \mu\text{K}$  である。

3次元的なドップラー冷却に、アンチヘルムホルツコイル対による四重極磁場を加え、対向するレーザー光を逆向きの円偏光にすることで、原子を1箇所にとどめておくことができる。原子の超微細構造においてエネルギー準位 ( $F$ : 超微細構造量子数) は  $2F + 1$  個の磁気副準位  $m_F$  を持つ。外部からの磁場が無い場合原子の磁気副準位は縮退しているが、磁場を付加することによってこの縮退が解ける。これをゼーマン効果という。このゼーマン効果によって原子は磁場の大きさ

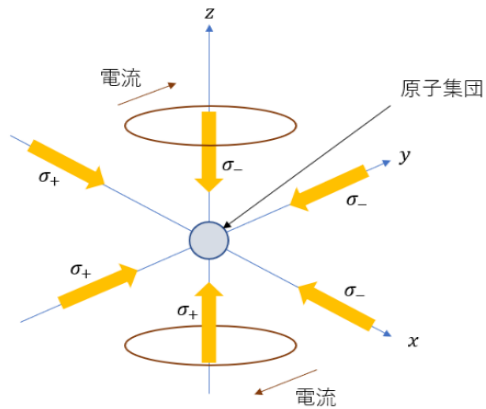


図1. MOT 配置図

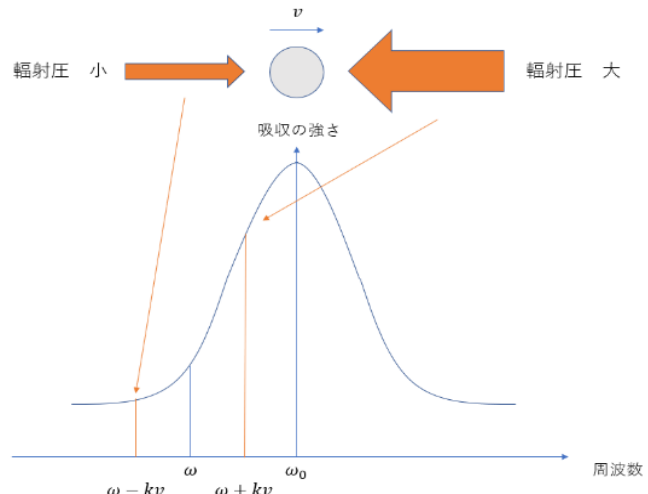


図2. 原子の受ける輻射圧

に比例したエネルギーシフトを起こし、原点から離れるにしたがって原子の共鳴周波数がシフトする。議論を簡単にするため原子の基底状態の準位と励起状態の準位をそれぞれ  $F = 0$ ,  $F' = 1$  として考えると、図3のように  $z \neq 0$  では、 $F' = 1$  の準位は  $m_F = 0, +1, -1$  に分裂しており、励起するのに必要なエネルギーに位置依存性が生まれる。ここに  $\sigma_+$  と  $\sigma_-$  の円偏光のレーザーを照射する。 $\sigma_-$  の円偏光のレーザー光に向かい原点から離れていく原子は、ゼーマンシフトにより共鳴に近づき、同時に  $\sigma_+$  の円偏光のレーザー光からは共鳴から大きく離れる。したがって  $\sigma_-$  の光を大きく吸収し、原子は中心に戻される向きに力を受ける。 $\sigma_+$  の円偏光のレーザー光に向かい原点から離れていく原子も同様に中心に戻される向きに力を受け、原子は原点の位置に集められる。原子に対して3次的にゼーマン効果を用いたドップラー冷却を行い、1箇所集める方法を MOT という。

## 2.2 偏光勾配冷却

2.1 で述べたドップラー冷却温度から、照射するレーザー光の偏光状態を利用してさらに冷却を行う方法に偏光勾配冷却がある。

対向する逆向きの円偏光の重ね合わせによって、螺旋を描くような直線偏光の偏光勾配が形成される(図4)。この偏光勾配中を速度  $v$  で移動する原子は、速度に応じて円偏光を受けているように感じ、さらに速度の向きによって受ける円偏光の向きが逆になる。ドップラー冷却によって速度が減少すると、励起状態の原子の分布が減少し、基底状態の  $m_F = +1, -1$  の2つの副準位に分布が偏る。この副準位に応じて原子は  $\sigma^+$  光と  $\sigma^-$  光から力を受け、副準位間での遷移を繰り返し、その際に受ける輻射圧によってさらに冷却が成される。このような偏光勾配によって起こる冷却を偏光勾配冷却という。偏光勾配冷却による  $^{87}\text{Rb}$  原子の冷却限界温度はおよそ 180nK である。

## 2.3 TOF (Time OF Flight) 法を用いた温度の測定方法

TOF 法とは、測定するものの2点間を飛行する時間から速度を求める方法である。本実験では図5に示すように MOT で冷却、捕獲された原子集団を落下させる。この原子集団の重心は自由落下運動をするとみなせて、重心から見て原子集団は、等方的に球状に広がっていく運動をしている。一定の距離下方に設けた計測地点を通過する原子集団の拡がりの変化を計測することで、原子集団が落下運動を始めた時の速度を求めることができ、二乗平均速度  $v_{rms}$  と温度  $T$  の間には原子の質量を  $M$ , ボルツマン定数を  $k_B$  として

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{k_B T}{M}} \quad \dots (1)$$

の関係がある。測定では落下運動をしている原子集団にレーザー光を照射して蛍光を発生させ、その蛍光の強度分布を計測する。蛍光の強度は原子数に比例すると考え、温度ごとに求めた、計測地点を通過する原子数の分布と蛍光の強度分布を比較する。

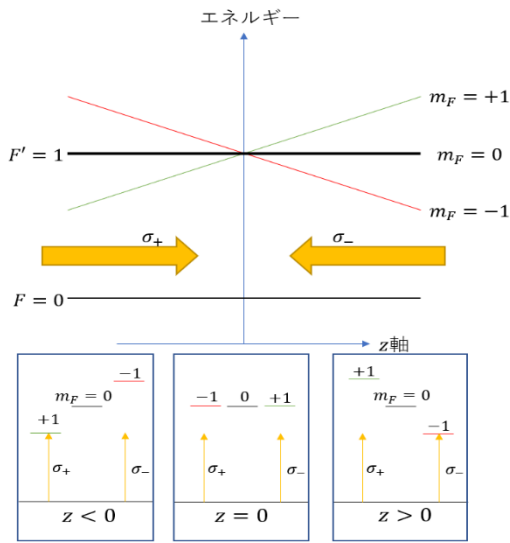


図 4. MOT の原理

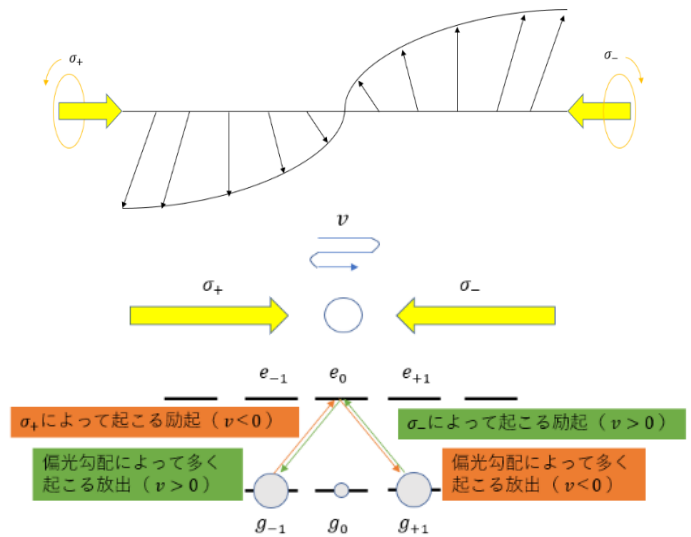


図 5. 偏光勾配冷却の原理

原子の速度分布を Maxwell-Boltzmann 分布，原子集団での原子の分布をガウス分布と仮定すると、落下開始から  $t$  秒後に位置  $\mathbf{r}$  に存在する原子数は、重心の位置を  $\mathbf{r}_G$  として

$$n(\mathbf{r}, t) = \left( \frac{1}{2\pi\sigma_t^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left( -\frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_G|^2}{2\sigma_t^2} \right) \dots (2)$$

と表される。ここで  $\sigma_t$  は、 $t$  秒後の原子集団の分布の半径であり、落下開始時の原子集団の半径を  $\sigma_0$  として

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_0^2 + (v_{rms}t)^2} = \sqrt{\sigma_0^2 + \frac{k_B T t^2}{M}} \dots (3)$$

である。(2), (3) 式から、 $\sigma_0 = 1\text{mm}$  として、70mm 下方の計測地点を通過する原子集団の原子数密度を、温度ごとに求めたものが図 6 であり、これと蛍光の強度分布を比較することで、原子集団の冷却温度を見積もった。

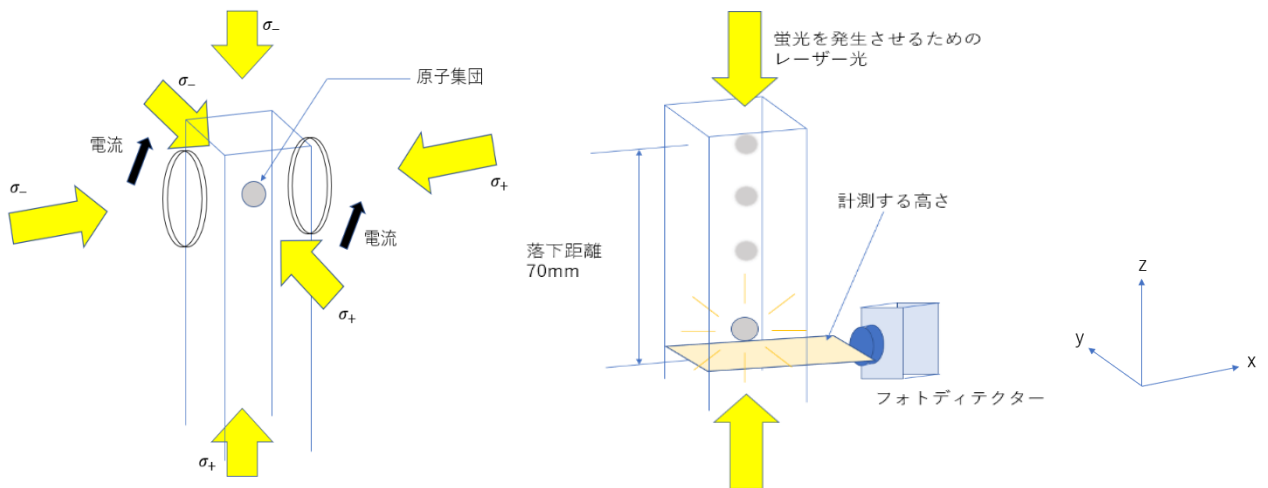


図 5. 実験系

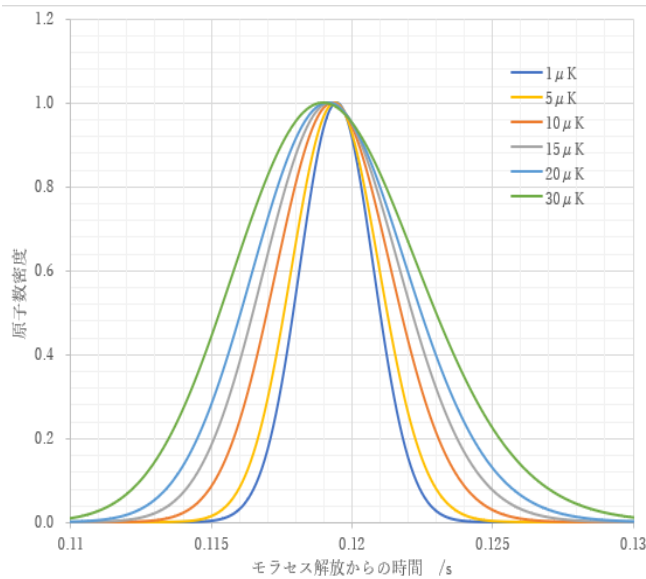


図 6. 温度ごとの原子数密度

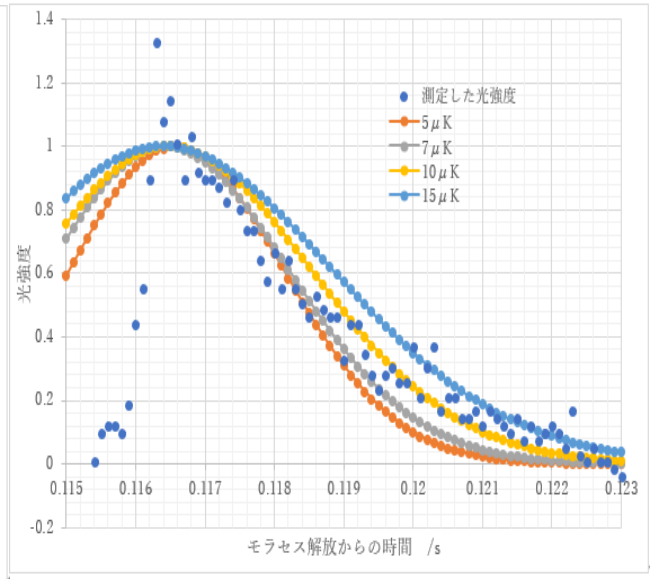


図 7. 計測した蛍光の強度分布

### 3 実験の方法

図 5 に示すような配置で MOT, 偏光勾配冷却によって原子を冷却し、落下させて、MOT の中心から 70mm 下方での蛍光の強度を測定した。測定した結果と図 6 を比較して冷却温度を見積もった。

### 4 実験の結果

測定した光強度のうち、蛍光の部分を拡大したものが図 7 である。計測したデータと離れているものはノイズによるものと判断し、強度分布の裾の広がりから原子集団はおよそ 10~15  $\mu\text{K}$  まで冷却されていると見積もった。

### 5 結論

作成した冷却原子源は 10~15  $\mu\text{K}$  まで冷却されている。これは  $^{87}\text{Rb}$  原子のドップラー冷却温度の 147  $\mu\text{K}$  よりも低い温度であることから、MOT, および偏光勾配冷却はちゃんと機能していると考えられる。しかし先行研究[1]では 2  $\mu\text{K}$  ほどまで冷却されたルビジウム原子を用いて原子干渉計を作成している。この冷却温度を達成するのが今後の課題であるが、細かいレーザーのアライメントやパラメータの調整をより厳密に行うことで達成可能ではないかと考える。

### 参考文献

- [1] A. Bonnin 『Interferometrie Simultanee avec Deux Especies Atomiques 87Rb/ 85Rb et Applications aux Mesures Inertielles』 Universite Paris-Saclay (2015)