

論文の内容の要旨

論文題目 極低温連続波原子線源の開発

氏名 岡村 幸太郎

近年のレーザー冷却・トラップ技術の発達により、高輝度な原子波源が実現されるようになった。また、例えば誘導ラマン過程によってコヒーレントに原子波を分割したり重ね合わせたりすることが出来るようになってきている。このようにして要素技術が揃ったことにより、原子波を用いた干渉計、原子波干渉計の実験が多く行なわれるようになってきている。

原子干渉計の感度を向上させるためには、原子干渉計内の位相差を増大させる、または位相差検出感度を向上させる必要がある。例えば原子波ジャイロスコープの場合、位相差増大のためには干渉計の囲心面積を増大させる必要がある。このためには干渉計のサイズを増大する必要があるが、これにより外場、特に残留磁場の影響が大きくなる。一次のゼーマンシフトは原子の状態を $m_F = 0$ と選ぶことで 0 に出来るが、二次のゼーマンシフトが残る。これを最少化するためにはスピンを持たない原子を用いることが望ましい。また、干渉計の面積を増大させるためには、二つの原子の経路の間の距離をできる限り大きくとる必要が有る。この距離は、原子波を分割する際の偏向角に比例する。原子波をコヒーレントに分割する手段としては誘導ラマン遷移を用いるもの、微細加工によって作られる回折格子を用いるものが挙げられるが、その際に与えられる横方向速度はせいぜい cm/s のオーダーであるので、偏向角を大きくするためには原子の初期速度を小さくする必要が有る。地球上で実現できるものとしては、静止した状態で生成して落下させるのが最も低速な原子線となる。

位相差検出感度を向上するためには干渉出力の検出精度を向上させなくてはならない。検出感度は究極的には検出原子数のランダム揺らぎにより制限される。原子数の相対揺らぎは原子数の平方根に反比例するので、干渉計用原子線源には出力線束の大きいことが求められる。

出力原子線束を増大していった場合に考慮すべき事項として、原子同士の二体衝突によるエネルギーシフトがある。これは原子の密度に比例するため、原子をパルス的に出力する場合にとくに顕著になる。このことから、干渉計用原子線源は連続出力であることが望ましい。

上記の理由に基づき、本研究では極低温、連続出力でスピンを持たない原

子を出力する原子線源の開発を行なった。

磁気光学トラップは広い速度範囲の原子を収集し、スピンをを持った原子の場合は中心部での偏光勾配冷却によりドップラー限界温度以下にまで冷却可能な冷却/トラップ手法であり、レーザー冷却実験で広く用いられている。しかし、原子数を増大していった場合、輻射トラッピングによる温度上昇、光励起衝突による原子損失が顕著になる。このため、磁気光学トラップを原子線源として用いる場合、連続的に原子を出力することにより一時に蓄積する原子数を少なく保つのが望ましい。

これまでレーザー冷却実験で広く用いられてきたアルカリ金属原子ではある瞬間に磁気光学トラップ可能な遷移は一つしかない。このため、連続的に出力しようとした場合、原子収集に最適な実験条件と低温への冷却に最適な実験条件とが異なることから、収集と冷却を空間的に分離するといったような複雑な実験系にならざるをえない。これに対し、本研究で用いたストロンチウムはアルカリ土類金属原子であり、同時同一空間で磁気光学トラップに使用可能な遷移が二つある。それぞれの遷移に原子収集と低温への冷却を役割分担させることができるので、単純な磁気光学トラップにより極低温連続出力原子線源を構成することができる。

ストロンチウム原子は基底状態 $5s^2 1S_0$ の他に $5s5p^3 P_0, 5s5p^3 P_2$ の二つの準安定状態を持つ。これら3準位のうち、基底状態と 3P_2 準安定状態はそれぞれ上準位 $5s5p^1 P_1, 5s5d^3 D_3$ 状態との間でほとんど閉じた遷移 ($\Gamma=30\text{MHz}/10\text{MHz}$) を持ち、磁気光学トラップが可能である。この二つの磁気光学トラップは共有する準位がないので同時同一空間で行なうことができる。基底状態の磁気光学トラップ内では、上準位 $5s5p^1 P_1$ から $5s4d^1 D_2$ を経由した緩和により $5s5p^3 P_2$ 準安定状態が生成される。 $5s5p^3 P_2$ 準安定状態の磁気光学トラップ内でも同様に、上準位 $5s5d^3 D_3$ から $5s6p^3 P_2$ を経た緩和により $5s5p^3 P_0$ 準安定状態が生成される。 $5s5p^3 P_0$ 状態はスピンを持たず磁場と相互作用しないので重力により落下し、連続波原子線源となる (図 1)。 $5s5p^3 P_2$ 状態原子の磁気光学トラップ中心部では偏光勾配冷却が行なわれるため、ドップラー限界以下の温度が期待できる。

実際に実験を行なったところ、基底状態磁気光学トラップの原子数が大幅に増大した。これは、 3P_2 準安定状態冷却過程上準位 $5s5d^3 D_3$ からの緩和で $5s5p^3 P_0$ 状態に比べて $5s5p^3 P_1$ (寿命 $21\mu\text{s}$) が一桁程度多く生成され、これが基底状態に戻ってしまうために起きると考えられる。また、 3P_2 準安定状態磁気光学トラップの寿命がトラップ内運動の緩和時間と同程度となっていたため、トラップサイズが大きくなり、到達温度も高くなっていた。これらの問題を解決するために $5s5p^3 P_1 - 5s5d^3 D_2$ 遷移への共鳴光を照射し、 $5s5p^3 P_1$ から $5s5p^3 P_2$ への光ポンピングを行なった。光ポンピング付き 3P_2 準安定状態磁気光学トラップの寿命を $5s5p^3 P_0$ 原子出力有り無しで比較することにより $5s5p^3 P_2$ 状態から $5s5p^3 P_0$ 状態への変換効率として 74% を得た。また、光

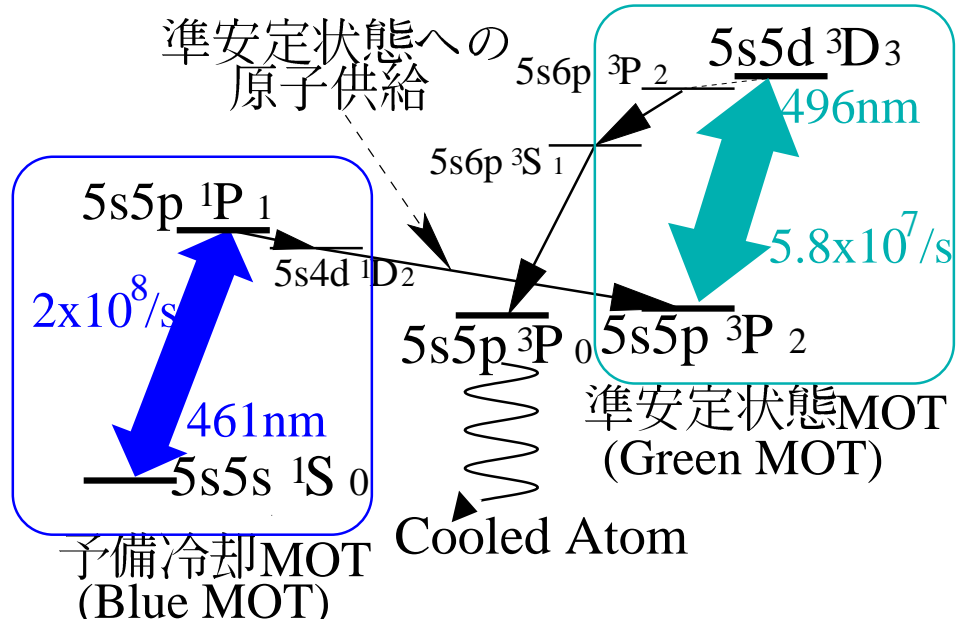


図 1: 準安定状態磁気光学トラップ遷移図 (理想的)

ポンピングの有無による基底状態磁気光学トラップの寿命の変化を調べることで $5s4d^1D_2$ から $5s5p^3P_{1,2}$ への緩和の分配比を 6:1 と決定した。

$5s5p^3P_0$ 状態連続出力原子線の温度を Time of Flight 法で低温/高温 2 成分モデルによりフィットして測定したところ、低温成分の温度としてドップラー温度 0.25mK を下回る $80\mu\text{K}$ を得た。しかし、 3P_2 準安定状態磁気光学トラップの離調を変化させた実験では、大きな離調で出力原子数が極端に減少し、また原子の初期分布が拡大したことによって誤差に対して敏感になり、S/N 比が低下して温度の離調依存性は観測できなかった。これは離調が大きくなったことにより磁気光学トラップの安定性条件が破れて $5s5p^3P_2$ 状態原子を捕獲しきれなくなったためと考えられる。 $5s5p^3P_0$ 状態原子の出力を止めた 3P_2 準安定状態磁気光学トラップの温度を測定したところ離調依存性を示して $20 \sim 30\mu\text{K}$ 程度が達成されていることが確認できたため、捕獲できた原子については偏光勾配冷却が有効に効いているものと考えられる。

離調を大きくとった状態で $5s5p^3P_2$ 状態原子の捕獲確率を向上させるため、第二の 3P_2 準安定状態磁気光学トラップビームを設置した。これは中心に直径 5mm の穴が空いた、 $+80\text{MHz}$ 周波数シフトしたビームで、これを離調 $-\Gamma$ 程度にすることでトラップ中心から 2.5mm 以上外れた原子を確実に捕獲するものである。トラップ中心に捕獲された原子には第二のビームは当たらず、離調 $-\Gamma$ 程度の偏光勾配冷却が実現される。

実験を行なったところ、低温成分の温度として $30\mu\text{K}$ が達成された。原子

線束は $9 \times 10^7 [\text{s}^{-1}]$ であった。

本研究において開発した極低温連続波原子線源は他の手法による連続原子線と同程度以下の温度を実現した。無スピンの原子線源としては最低温度である。原子線束は実験装置の改善により 2 桁程度の改善が可能と見込まれる。