

アトムチップを用いた ^{40}K フェルミ縮退原子の生成

電気通信大学大学院 電気通信学研究科 量子・物質工学専攻
中川研究室 0533025 後藤亮彦

1 研究背景と目的

1924年にEinsteinによって予言されたボーズ凝縮体は、その予言から70年以上経過した1995年にJILAのC.E.WiemanとE.A.Cornellたちのグループで ^{87}Rb の原子で始めて実現された。それ以来この分野の研究は急速に進展し、数多くの中性原子でのボーズ凝縮体の生成が確認されている。そして現在、レーザー冷却によるボーズ凝縮体による実験が広まる中、自然界に存在するもう1つの粒子であるフェルミ粒子の量子縮退の実験が急速に注目され始めてきた。フェルミ粒子は自然界の至るところに存在していて、物質を構成している電子、陽子、中性子など、これらすべてはフェルミ粒子である。一般的に自然界に存在するフェルミ系は密度が高く強い相互作用をもっているが、極低温のフェルミ粒子は粒子間の相互作用が非常に弱い希薄な系を構成していて、理論的に扱うことが容易となる。このような利点から、粒子間の相互作用が非常に弱いフェルミ縮退した原子を用いることで、超高精度な原子干渉計への応用などが期待されている。

そこで私はフェルミ縮退原子(^{40}K)を用いての原子干渉計の構成を目指している。我々の研究室では、すでにボーズ粒子である ^{87}Rb のサーマル原子やBECを用いての原子干渉計の構成に成功している。しかし、ボーズ粒子ではS波散乱が存在するため、原子間の衝突を無くすことはできなく、干渉計構成の際に原子間の衝突により位相シフトが生じ、コントラストの低下に繋がると考えられる。一方フェルミ粒子は同一スピン状態でのS波散乱が存在しないため、極低温状態では原子間の衝突をほとんど無くすることができる。このため、フェルミ縮退した原子を用いることで超高精度な原子干渉計を構成できることが期待される。

2 ^{40}K フェルミ縮退の生成手段

2.1 フェルミ縮退の生成手段

一般的にボーズ粒子を冷却してボーズ・アインシュタイン凝縮を生成する際には、まず磁気光学トラップによって $100\mu\text{K}$ 程度まで冷却された原子をトラップし、偏光勾配冷却によって数 μK まで冷やし、磁気トラップで断熱圧縮をした後、蒸発冷却によってさらに原子を冷やすことによってボーズ・アインシュタイン凝縮を生成する。このようなレーザー冷却法は原子の統計性の如何に関わらず有効であり、レーザー冷却によってフェルミ粒子も冷やすことができる。しかし、フェルミ粒子の場合は同一フェルミ粒子では波動関数の

反対称性の要請によって低エネルギーでは散乱断面積はゼロになる。ここで問題になるのが蒸発冷却の効率が弾性衝突の確率によって支配されているということである。このため、フェルミ縮退を生成するためには同じフェルミ粒子同位体で異なるスピン状態のフェルミ粒子を用いるか (例、図1の ^{40}K の $|F = 9/2, m_F = 7/2\rangle$ と $|F = 9/2, m_F = 9/2\rangle$ の状態)、フェルミ粒子とボーズ粒子の混合体を用いなければならない (例、図1の ^{40}K の $|F = 9/2, m_F = 9/2\rangle$ と ^{87}Rb の $|F = 2, m_F = 2\rangle$ の状態)。



図 1: 基底状態エネルギー準位

そこで我々は、フェルミ粒子とボーズ粒子の混合体を用いる方法で ^{40}K のフェルミ縮退を生成ことにした。理由としては異なるスピン状態のフェルミ粒子を用いる場合は、各々のスピン状態間ではS波散乱がないため、2つのスピン状態の原子を均等に蒸発冷却していかなければならないのに対し、フェルミ粒子とボーズ粒子の混合体を用いる方法ではボーズ粒子のみを蒸発冷却すればよく、フェルミ粒子は個数をほとんど減らすことなく、フェルミ縮退を生成できるという点があげられる。尚、混合体での用いるフェルミ粒子が ^{40}K 、ボーズ粒子が ^{87}Rb である。

2.2 共同冷却

まず蒸発冷却について簡単に説明する。図2の (a) で示されるように、蒸発冷却の際にはエネルギーの高い原子を選択的に取り除いて、冷えた原子のみを残す。その後、残った冷えた原子間の弾性衝突によって原子は熱平衡化され、これを繰り返すことによって温度を徐々に下げることができる。また、このことから蒸発冷却の効率を決めるのは原子間の弾性衝突であることが理解できる。一般的に同一スピン状態のフェルミ粒子だけでは蒸発冷却ができないのは、極低温状態では原子間の衝突がないため、弾性衝突による熱平衡化が起きないからである。 ^{40}K と ^{87}Rb の共同冷却の原理も基本的に蒸発冷却の原理と同じであり、フェルミ粒子は極低温状態では同一スピン状態の弾性衝突はほとんど無いが、違う原子との弾性衝突は起きるため ^{87}Rb の温度の高い原子のみを選択的に取り除いて、冷えた ^{87}Rb と ^{40}K を弾性衝突させることで ^{40}K を冷やすことができる。これを繰り返すことで ^{40}K を徐々に冷やしフェルミ縮退を生成する。

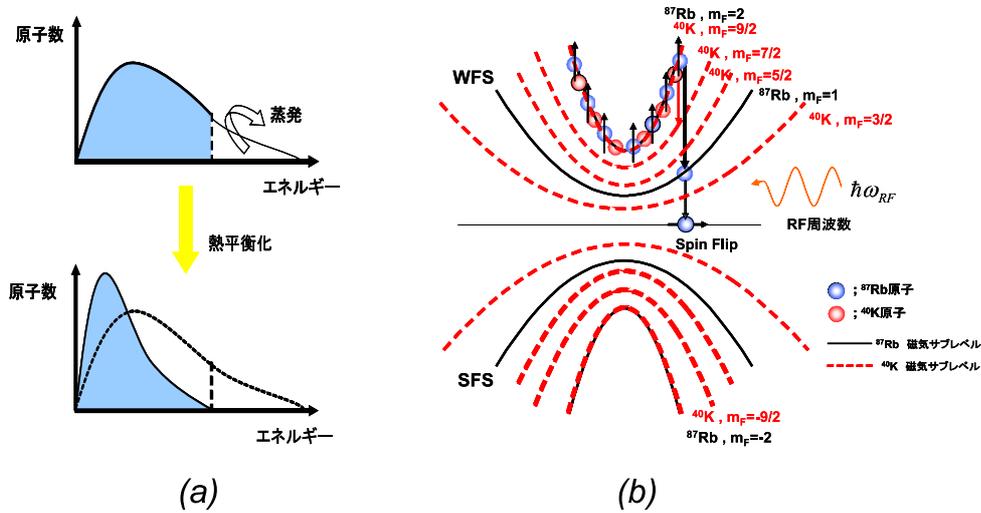


図 2: 共同冷却

実際に共同冷却する際には、図 2 の (b) に示されるように、外場から rf 周波数を加えて ^{87}Rb の $|F = 2, m_F = 2\rangle$ の温度の高い原子に対し、磁気サブレベル間での遷移を共鳴的に起こし、原子を spin flip させ磁気トラップから逃がす。さらに残った原子の熱平衡化の後、rf 周波数を温度の低い原子の磁気サブレベル間の共鳴に近づかせていくことで、徐々に原子の温度を冷やす。また、 ^{40}K と ^{87}Rb の磁気サブレベル間のエネルギーシフト差の違いは g 因子のみに依存し、 ^{87}Rb の $5^2S_{1/2}, F = 2$ の g 因子は $1/2$ 、 ^{40}K の $4^2S_{1/2}, F = 9/2$ の g 因子は $2/9$ なので、明らかに ^{87}Rb の g 因子の方が大きく、外場から rf 周波数を加えた時 ^{87}Rb の磁気サブレベル間での遷移を共鳴的に起こすような周波数では、 ^{40}K の原子はほとんど spin flip させられない。このため、 ^{40}K と ^{87}Rb の共同冷却では rf 周波数を数十 MHz ~ 数 MHz へと掃引していくことで、 ^{87}Rb の温度の高い原子から選択的に取り出し、最終的に ^{87}Rb 原子を全て取り出し、 ^{40}K はほとんど個数を減らすことなくフェルミ縮退を生成することができる

3 実験装置

実験装置は図 3(a) に示すように、アトムチップを用いた装置となっている。この装置でのフェルミ縮退の生成方法だが、おおまかな流れとしてはまずアトムチップより 5cm 下の位置で ^{40}K と ^{87}Rb の同時トラップを行なう。次に、CMOT、PGC を行い、光を切り MOT コイルの磁場によって磁気トラップを行う。さらに輸送コイルに徐々に電流を流すことで磁場のミニマムを移動させ、原子をアトムチップ表面まで輸送し、チップ表面で原子を再トラップした後に、外部から rf 周波数を加えることで共同冷却をして、 ^{40}K フェルミ縮退生成を目指す。アトムチップを用いる一番のメリットとしては、アトムチップの近傍 (数百 μm) で磁場のミニマムを生成できるので、コイルでは生成が容易ではない急激

な磁場勾配を持つ磁気ポテンシャルの生成が可能であるということであり、このため冷却原子の圧縮効率が飛躍的に向上し弾性衝突確率が大きくなるので、共同冷却を効率良く行なうことができ、結果として短時間 (~ 数秒) でのフェルミ縮退の生成が可能となる。

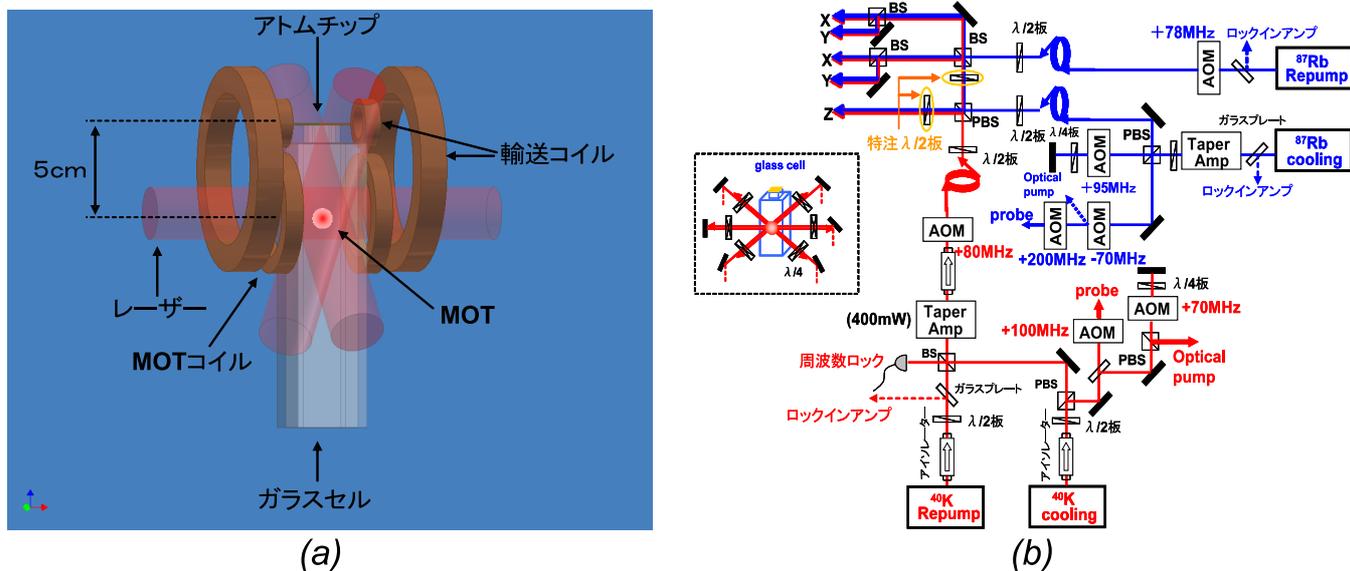


図 3: 実験装置および光学系

実験を行なう上での光学系の概要は図 3 の (b) に示すようになっていて、 ^{40}K は Cooling および Repump の重ねた光をテーパアンプによって 450mW まで増幅し、 ^{87}Rb については、Cooling 光のみテーパアンプを用いて 400mW まで増幅している。 ^{40}K と ^{87}Rb のそれぞれの光は偏波保持ファイバーを通った後、PBS によって重ね、その後は共通の光学素子を通っている。ビーム径は ^{40}K , ^{87}Rb とともに $1/e^2$ のビーム径が 18mm 、パワー密度は ^{40}K の Cooling 光が $3.4\text{mW}/\text{cm}^2$ 、Repump 光が $1.7\text{mW}/\text{cm}^2$ 、 ^{87}Rb の Cooling 光が $5\text{mW}/\text{cm}^2$ 、Repump 光が $0.8\text{mW}/\text{cm}^2$ である。離調などは図 4 に示すような値となっている。

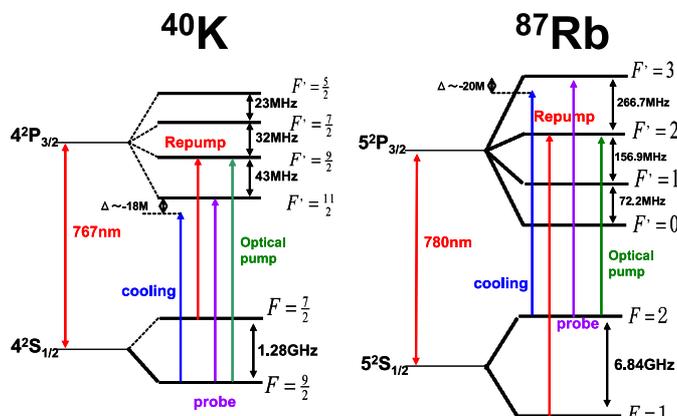


図 4: エネルギー準位

4 実験

実験の現状としては、 ^{40}K と ^{87}Rb の同時トラップまで達成できている。磁気光学トラップをする際には、後の磁気トラップの寿命のことを考えると、真空度をあまり下げることなく、多くの原子をトラップすることが必要となるため、光誘起脱離 (Light Induced Atom Desorption :以下 LIAD) という方法を用いている。LIAD の原理は簡単に説明すると、図5で示されるように、ガラスセル内側に原子が吸着された状態で、セルの外側から紫外 LED を照射することで、セル内の原子の圧を一時的に上昇させるという方法である。LIAD の利点としては、ディスペンサーの ON,OFF と違い瞬時にセル内の圧力コントロールが可能であるという点である。

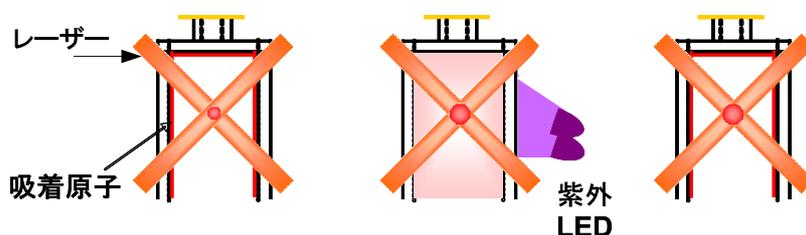


図 5: LIAD の原理

図6がLIADによる ^{40}K 原子(a)と ^{87}Rb 原子(b)のローディングを測定したものであり、 ^{40}K はMOTの原子数は 5×10^6 個、寿命はおよそ15秒、 ^{87}Rb はMOTの原子数は 6×10^7 個、寿命はおよそ15秒である。

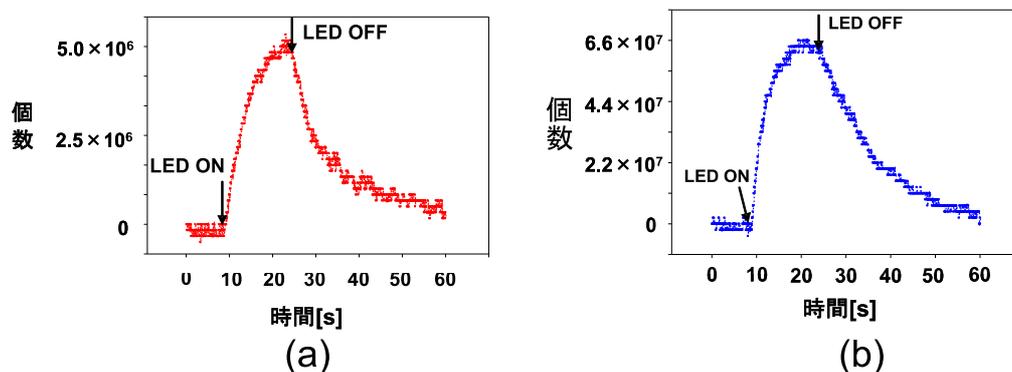


図 6: LIAD による MOT のローディング

次に同時トラップだが、図7(a)は ^{40}K と ^{87}Rb のディスペンサーに電流を流しガラスセル内の原子の圧力が定常状態になったときに、 ^{40}K と ^{87}Rb の repump 光をシャッターによって ON,OFF したときの蛍光から見積もった原子の個数である。 ^{40}K の repump 光のみが ON になっている状態が ^{40}K の MOT の個数で、 ^{87}Rb の repump 光のみが ON になっている状態が ^{87}Rb の MOT の個数で、両方の repump 光が ON になっている状態が同時トラップの際の MOT の個数である。 ^{40}K の個数はおよそ 3.0×10^7 、 ^{87}Rb の個数はおよそ 2.5×10^8 個、同時トラップの個数はおよそ 2.8×10^8 個である。

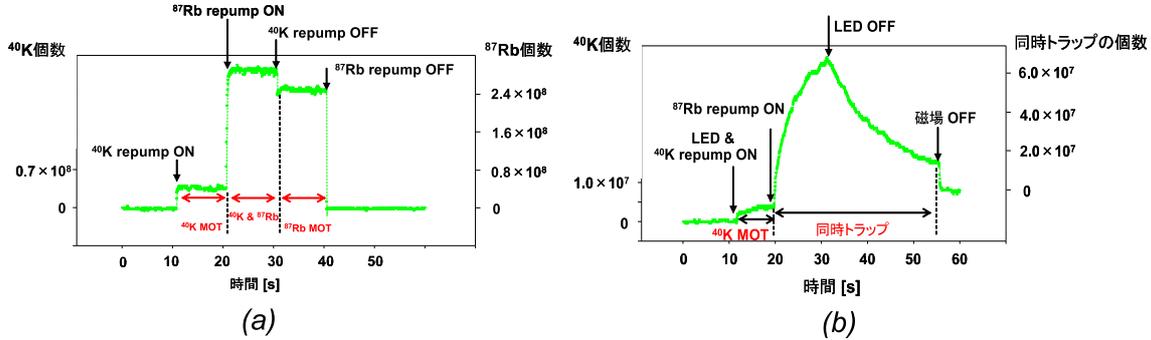


図 7: 同時トラップ

図 7(b) は LIAD による同時トラップのローディングを測定したもので、同時トラップの個数はおよそ 6×10^7 個である。同時トラップの際の寿命もおよそ 15 秒である。また同時トラップ中での ^{40}K と ^{87}Rb の原子数は、767nm フィルターと 780nm フィルターを用いてそれぞれの原子数を観測したところ、 ^{40}K の単体での個数 $^{40}K_{single}$ はおよそ 5×10^6 個、同時トラップ中での個数 $^{40}K_{double}$ はおよそ 4×10^6 個となり、 ^{87}Rb は単体での個数 $^{87}\text{Rb}_{single}$ はおよそ 6×10^7 個、同時トラップ中での ^{87}Rb の個数 $^{87}\text{Rb}_{double}$ もおよそ 6×10^7 個であった。同時トラップ中で ^{40}K の原子数が減っているのは、同時トラップ中での ^{40}K のレート方程式を考えると

$$\frac{dN_K}{dt} = \dot{N}_K - \dot{N}_K N_K - \dot{N}_K \int n_K^2 dV - \dot{N}_{K,Rb} \int n_K n_{Rb} dV \quad (1)$$

と表すことができ、 \dot{N}_K はローディングレート、 $\dot{N}_K N_K$ はバックグラウンドガスとの衝突によるロスレートを表している。また 1 式の右辺の第 3 項は MOT の領域での K ガス同士の衝突によるロス、第 4 項が MOT の領域での K と Rb ガスの衝突によるロスを表している。 ^{40}K の MOT 単体の時は第 4 項がなく、同時トラップの際に第 4 項が現れるので、同時トラップの際には ^{40}K の MOT の個数が減ることがわかる。同時トラップの際に ^{87}Rb の個数がほとんど減ってないのは、 ^{87}Rb の MOT の個数が ^{40}K の個数に比べて 1 桁程多いので、 ^{87}Rb の場合は第 4 項より第 3 項によるロスが支配的になり、同時トラップの際に個数はほとんど減らないと考えられる。

5 まとめと今後の展望

我々の研究室では ^{40}K のフェルミ縮退原子を用いての原子干渉計を目指している。実験の現状としては ^{40}K と ^{87}Rb の同時トラップまで達成され、LIAD による MOT の個数は $^{40}K_{single}$ が 5×10^6 個、 $^{87}\text{Rb}_{single}$ が 6×10^7 個、同時トラップ中では $^{40}K_{double}$ は 4×10^6 個、 $^{87}\text{Rb}_{double}$ は 6×10^7 個トラップし、寿命はおよそ 15 s 得られている。今後の展望は、最適化等を行い、 ^{40}K の個数を 10^7 個程度まで増やし、その後磁気トラップ、輸送、共同冷却と移行しフェルミ縮退の生成を目指す。