

ストロンチウム原子の量子縮退領域へのレーザー冷却

科学技術振興事業団 協同励起プロジェクト

香取秀俊

1. はじめに

これまでに3種のアルカリ金属と水素の希薄原子気体でボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) が実現し、基礎物性の検証とともに原子波干渉による極限計測や原子リソグラフィのためのコヒーレントな原子源等の広範な応用的側面からも関心をもたれている。凝縮原子種の拡張は今後の重要な課題の一つであろう。例えば負の散乱長をもつリチウム-7 原子での準安定状態 BEC の観測¹に代表されるように、凝縮原子の物性はその原子の内部状態を反映した多様性をもつことが実験的にも示され、また一方で、縮退フェルミ原子の実現やその対形成凝縮のダイナミクス等のフェルミ粒子系での物理現象の探索は、レーザー冷却による量子縮退原子の研究が向かう一つの方角と考えられる。今日に至るまで、量子縮退原子生成の手法はレーザー冷却等によって予備冷却された原子気体に対する“磁気トラップ中の蒸発冷却”のみに限られていて、他の原子族への拡張には新たな冷却手法の確立が必要となる。特に、全光学的手法を用いた BEC 達成は、凝縮原子の操作性の観点からも非常に興味深い。

量子縮退原子を得るためには、その位相空間密度 $\rho = \lambda_{dB}^3 \cdot n$ (ここで $\lambda_{dB} = h/(2\pi M k_B T)^{1/2}$ は温度 T の原子のド・ブロイ波長、 n は原子密度) を1程度にすることが必要であるが、従来のドブラー冷却や偏光勾配冷却等、光を使った冷却方法では、冷却の過程で生じる自然放出光の再吸収や、原子間の共鳴双極子相互作用等による加熱・トラップロスがトラップ原子密度の上限を決め、その値は $n \sim 10^{12}/\text{cm}^3$ とされている。従って、レーザー冷却法だけに頼って量子縮退領域を狙うためには、この密度の上限を達成しつつ、原子を光子の反跳温度程度までレーザー冷却し $\lambda_{dB} \sim 1\mu\text{m}$ とすることがまず必要になる。

2. ストロンチウム原子の磁気光学トラップ

このような全光学的手法による量子縮退原子の生成に向けた新しいアプローチとして、我々はアルカリ土類原子のスピン禁制遷移を利用した磁気光学トラップを提案し、実験を行ってきた。アルカリ土類原子では、1) 基底状態が閉殻の 1S_0 状態であり非弾性衝突チャネルがないために高密度トラップの可能性があり、2) 1S_0 - 3P_1 間のスピン禁制遷移を用いることで、光子の反跳限界温度までのドブラー冷却が可能になる。また3) 同位体中にフェルミ粒子が豊富に存在し、かつそれらは単純な超微細構造をしていることから容易にレーザー冷却できるため、同一の実験系で縮退フェルミ粒子の研究を行うことも可能になる。なかでも、ストロンチウム原子ではスピン禁制遷移の上準位が冷却実験に好都合な自然幅 $\gamma = 2\pi \times 7.6\text{kHz}$ であるために、磁気光学トラップ中で光子の反跳エネルギー $\hbar^2 k^2/2m$ 程度までドブラー冷却 $\sim \hbar\gamma$ しつつ³、重力に比べて10倍程度強い光の散乱力 $\hbar\hbar k\gamma/2$ によって重力場中で安定に保持することがきる。ここで、 k は光子の波数を表す。これまでに我々は、スピン禁制遷移を用いた磁気光学トラップ中でレーザー冷却によって密度 $\sim 10^{12}/\text{cm}^3$ 、最低温度 400nK の極低温高密度ストロンチウムを得ることに成功した⁴。これは位相空間密度 10^{-2} に相当し、従来の典型的なアルカリ金属原子の磁気光学トラップを用いた実験に比べて3桁程度の改善となっている。

3. 光双極子トラップの最適設計と原子のローディング

さらに2桁の位相空間密度の向上と BEC の実現に向けて、非共鳴光双極子トラップ (Far-Off Resonant optical dipole Trap, FORT) によるトラップ実験を行っている。このような保存力トラッ

ブへ効率よくしかも加熱することなく原子をロードするためには、ポテンシャルの極小点の微小領域に原子を集めてから保存力トラップを起動させる等の工夫が必要になるが、高密度化を狙うための急峻なトラップでは、このような“原子雲のモードマッチ”を行って位相空間密度を低下することなく原子を移行することは容易でない。もし、FORT へのローディングの過程でエネルギーの散逸を起こさせることができれば、ローディングの過程で位相密度の低下を避けられるばかりか、向上させることも可能である。これを実現するための 1 つの方法として、FORT に原子を移行する過程で散逸力をもつ磁気光学トラップの併用が考えられる。

ストロンチウム原子での冷却遷移はスピン禁制遷移であり、この冷却遷移間の双極子モーメントは通常双極子遷移に比べて 3 桁程度小さい。この結果図 1 に示すように、冷却遷移の上下準位 1S_0 , 3P_1 はそれぞれ同じスピン状態間の双極子遷移で結ばれた準位 1P_1 , 3S_1 と強く結合するため、適当なレーザー波長 λ_F を選ぶことで、冷却遷移の上下準位にそれぞれ任意の光シュタルクシフトポテンシャルを作ることができる。FORT 中で、磁気光学トラップを共存させるためには、冷却遷移の上下準位 1S_0 , 3P_1 の光シフトポテンシャルを等しくすればよく、この条件は $\lambda_F \sim 800\text{nm}$ によって実現できる。これまでの実験では、 1S_0 – 3P_1 遷移の磁気光学トラップ中に半径 $17\mu\text{m}$ の FORT レーザーを交差して入射させる交差型 FORT⁵を形成することで、磁気光学トラップの 1/100 以下の体積に、およそ 5%の原子をローディングすることに成功し、このときの位相密度は 0.1 のオーダーになっている。光シフトポテンシャルと重力ポテンシャルの競合によって形成されるトラップポテンシャル障壁を低くすることで、トラップ原子温度の低下も観測され、FORT 中で原子の弾性散乱による十分な熱平衡化が行なえれば蒸発冷却による位相空間密度の向上も期待できる。その他、位相空間密度の向上のためには、 1S_0 – 3P_1 遷移を用いたサイドバンド冷却を行うことも検討している。特に後者では、ボース、フェルミ粒子に対して同様の冷却効率を期待できるため、量子縮退した同位体での統計性の違いに起因する巨視的な量子現象の観測の観点からも非常に興味深い。

参考文献

- ¹ C.C. Bradley, C.A. Sackett, and R.G. Hulet, Phys. Rev. Lett. **78**, 985 (1997)
- ² E. L. Raab, M. Prentiss, A. Cable, S. Chu, and D. Pritchard, Phys. Rev. Lett. **59**, 2631 (1987)
- ³ H. Wallis and W. Ertmer, J. Opt. Soc. Am. **B 11**, 2211 (1989)
- ⁴ H. Katori, T. Ido, Y. Isoya, and M. K-Gonokami, Phys. Rev. Lett. **82**, 1116 (1999)
- ⁵ C.S. Adams, H.J. Lee, N. Davidson, M. Kasevich, and S. Chu, Phys. Rev. Lett. **74**, 3577 (1995).

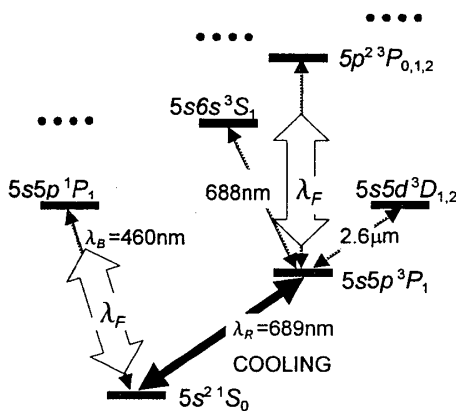


図 1 . 光双極子トラップレーザー（波長 λ_F ）による、冷却遷移の上下準位 1S_0 , 3P_1 のシュタルクシフトポテンシャルの変調。適当なレーザー波長 λ_F を選ぶことで、冷却遷移の上下準位にそれぞれ任意のシュタルクシフトポテンシャルを作ることができる。