

輸送制御を用いた レーザー冷却原子-ガラス表面の相互作用観測

Observation of interaction between laser-cooled atoms and glass surface
using precise controlled optical traps

物理学専攻 旭 智志

研究背景

屈折率の違う媒質へ光を入射させ全反射する際、境界面から垂直方向に入射波程度で指数関数的に減衰する電磁場（エヴァネッセント波）が存在する。このような光の場は近接場と呼ばれている。この近接場を利用した研究が盛んに行われている。1981年、BoisselとKerherveは、エヴァネッセント波中の原子分光に初めて成功し、近接場を使った固体表面と原子の相互作用測定が可能になった [1]。1991年、Betzigらは光ファイバーをテーパー状に細めたプローブから出る近接場光を用いて回折限界を超えた光磁気記録ができること、および、このプローブを用いて磁気光学効果による読み出しができることを明らかにし [2]、近接場光の応用も進められている。またGreinerは冷却原子を用いたガラス表面付近の顕微分光に成功している [3]。しかし、光近接場と原子の相互作用に関しては未解決な問題が残されている。

一方、1900年初頭に量子論が誕生し、量子論は、波動性と粒子性を統一することで古典論では証明できなかった問題を解決し、ミクロな物理現象を説明する基本的な理論となった。また、量子論により原子と光の相互作用の解明が進み、レーザー技術が進歩した。原子物理においては、レーザーを用いて原子を冷却、捕獲する技術が1980年代に飛躍的に発展した。冷却することで原子は低い運動エネルギー準位に縮退し、量子性が顕著になる。この冷却原子を使って精密分光、原子時計、原子波光学などが発展した。

光近接場と原子との局所空間での相互作用の観測において、室温原子では原子集団の持つ平均速度が大きく、相互作用時間が短いなどの問題点が挙げられる。一方冷却原子を用いることで、原子集団の平均速度を小さくすることが可能となり、相互作用時

間を長くすることができる。

研究目的

当研究室の目的は、主に冷却された原子の近接場（エヴァネッセント場）との相互作用の観測、またその局所空間（波長程度の大きさ）における遷移強度の制御を目標としている。そのためには、十分に冷却された原子を数 μm 以下の近接場領域まで近づける必要がある。私の本研究は、自動ステージの制御による冷却原子のガラス表面への輸送を実現し、冷却原子と近接場との相互作用の観測を目標とし、表面近傍で生じる冷却原子のダイナミクスの理解を研究目的とする。

冷却原子の輸送制御

本実験では、原子集団と表面で起こるダイナミクスを調べるために、そのサンプルを表面近くに精度良く輸送する必要がある。そこで、トラップ光の光学系を組み、自動ステージを用いた輸送制御を実現した。

光トラップへ冷却原子を導入した後、自動ステージを用いて輸送制御を行う。トラップレーザーは3枚のレンズを通り、原子集団にトラップ光の焦点が当たるようにセットアップを行った。1枚目のレンズは、Aerotech社製の自動ステージによってサブミクロンの精度で動かすことができる。レンズが移動することで、トラップ光の軌跡が変わり、焦点位置も変わる。焦点付近にトラップされた原子はそれに追従し、原子を表面近くまで輸送することができる。

撮影系の作成

原子の輸送に際して現行の撮影系では視野外にでしてしまうことから、新たに撮影系を組むことにした。図1はその模式図である。トラップ光が画像左からガラスセル上面に入射するのに対して、撮影光である probe 光を画面左から入射させ、同じく反射させる。反射してきた probe 光を CCD カメラに結像することで、吸収イメージングを行う。つまりガラスセルを下から覗き込むような撮影系である。ただしこの配置をとった時気をつけなければならないのは原子の吸収による影が、2つ見えるという特徴がある。それぞれを実像、鏡像と定義し、解析を行った。

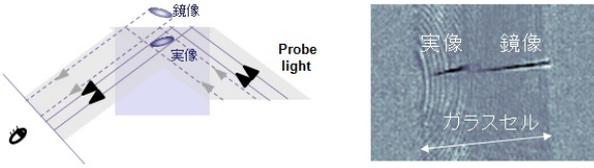


図1 反射型イメージング系のセットアップ

このような撮影系でレンズ変位量 L を変えていったときの影の様子を観測する。実際に得られた画像は図2である。今、原子の影の濃淡に色付けし、色が赤に近づくほど原子の密度が濃くなっている。また得られた画像はガラスセルが写る領域だけを切り出し、図の画面横方向に x 軸をとり、画像左端を $0[\text{pix}]$ と置いた。するとレンズ変異量 L を大きくするにつれて、2つの影が近づいていき、ある L でもって重なった後に再び離れていく様子が観測された。

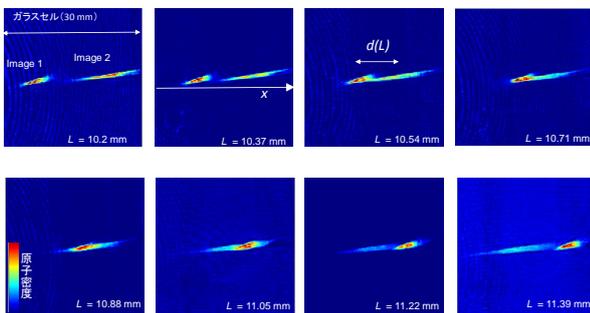


図2 反射型イメージング系による原子集団の影

今、2つの影と影との間を $d(L)$ [pix] と定義し、横軸をレンズ変位量、縦軸を L としてプロットした結

果が、図3である。図2を見ればわかるように、このイメージング系では、実像と鏡像との間が近づけば近づくほど原子は表面に近づいていることになる。それぞれの影に対し、レンズ変位量に対して画像上を線形的に移動すると仮定し、線形フィッティングを行った。この結果から $d(L)$ を求め、幾何学的に原子が表面からどれだけ近づいているかを見積もる。

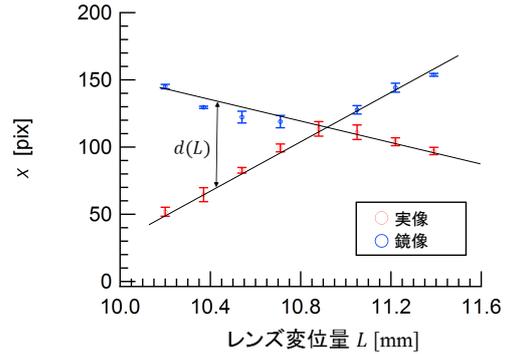


図3 レンズ変異量を変えたときの原子の影の変化

図4のように原子を点と見立てたときの表面からの距離を見積もる。probe 光は図のようにガラスセルに対して 7° で入射している。影と影との間隔を $\Delta x[\text{mm}]$ とおいた。今図2の画像の横方向の切り出しは、ガラスセルが見えている領域を切り出したものだった。その領域の大きさを $X[\text{mm}]$ とする。実際のガラスセルの上面は 30mm の大きさなので、 $X[\text{mm}] = 30 \sin 7^\circ$ [mm] の関係がある。一方、画面上では見ている領域は、 200pix であった。

つまり、画像水平方向に対して、 $30 \sin 7^\circ / 200 \div 0.018 \text{ mm/pix} = 18 \mu\text{m/pix}$ の関係がある。また図より $\Delta x[\text{mm}]$ は、

$$\Delta x = \frac{z}{\sin 7^\circ} \sin 14^\circ = 2z \cos 7^\circ \text{ [mm]} \quad (1)$$

以上より、表面からの距離 $z[\text{mm}]$ と $d(L)$ の関係は、

$$z = \frac{\Delta x}{2 \cos 7^\circ} = \frac{d(L) \times 0.018}{2 \cos 7^\circ} \text{ [mm]} \quad (2)$$

となる。この結果から $L = 11.0 \pm 0.1[\text{mm}]$ 付近が最も表面に近づいていることが分かった。

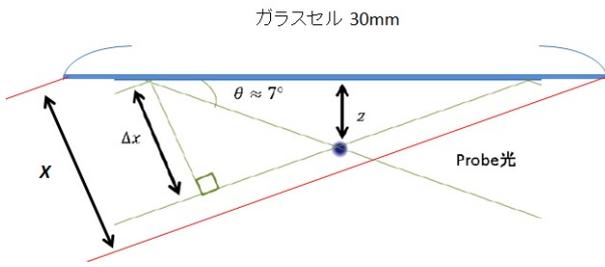


図4 イメージングセットアップ

表面近傍における光格子の形成

原子を表面付近に輸送するにあたって、トラップ光を切らずに表面付近で保持することを考える。トラップ光はガラス表面にて反射され、入射光と反射光が重なるオーバーラップする領域が存在する。一般に、波の打ち返しを考えると、入射波と反射波によって定在波が形成されるが、この場合においてもトラップ光による定在波ができると考えることができる。この定在波のことを光格子と呼ぶ。ここでは、その光格子によって原子がトラップされていることを仮定し、それを確かめるために、パラメトリック共鳴実験を行った [4][5]。

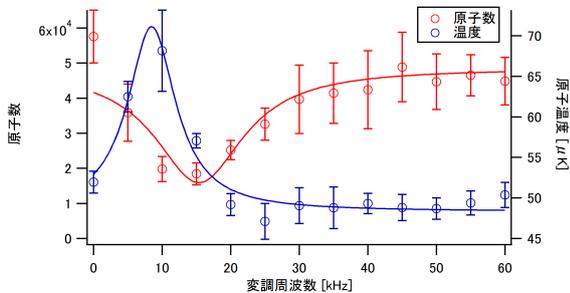


図5 横軸を変調周波数にとったときの原子数、温度との関係

図5は実験結果である。変調周波数は5kHzごとに、0~60kHzまで計測した。変調時間は200ms、強度変調は中心強度9Wの10~8Wの正弦波変調を行っている。図の赤いプロット点は原子数を表し、青い点は温度を表している。ここで変調周波数15kHz地点に原子数が減少、温度が増加していることがわかる。一般に強制振動系を考えたとき、解はローレンツ型で与えられるので、この得られたデータに対してフィッティングを行い、共鳴周波数を求

める。

原子数、温度に対してそれぞれ $N = N_0 + \frac{A}{(\omega - \omega_0)^2 + B}$ のフィッティング式を採用した。このことにより原子数、温度それぞれの共鳴周波数を求めてみると、15.4kHz、8.4 kHzとなる。この実験では最初にだいたいの共鳴点を探るため、大きく強度を変調し、変調時間も長くとっていたので、共鳴点以外の変調周波数でも原子に影響することが起きていると考えられ誤差が大きい。ここで原子数と温度の共鳴周波数に2倍程の差が出ているが、今後は原子数の減少に対しての共鳴周波数で議論を進めていく。

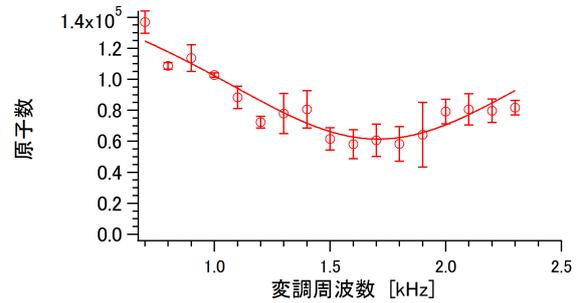


図6 変調周波数と原子数の関係

図6は変調周波数を0から2.5 kHzまで、0.2 kHz刻みで変調を行った。強度の変調時間は100msである。この結果は元々のトラップ光のトラップ周波数により共鳴を起こしていると考えられる。フィッティングの結果、ピークは1.7kHz付近に存在すると見積もられた。つまりもともとトラップ光が持つ動径方向のトラップ周波数は実験的に $\omega_r = 2\pi \times 1700/2 = 850$ Hz程度であると見積もられる。

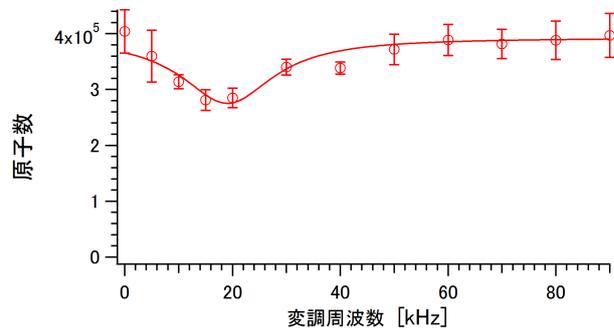


図7 変調周波数と原子数の関係

また図7は変調周波数を0から80 kHzまで、10 kHz刻みで変調を行った。強度の変調は100msの間、中心強度11Wの12~10Wで行っている。20

kHz 付近で共鳴が見えている。

光格子のトラップ周波数は、実験より $2\pi \times 20000/2 = 10$ kHz 程度と見積もられる。このように数十 kHz 付近での共鳴がみられていることから、実際に光格子に原子がトラップされていることは十分に考えられる結果が得られた

表面-原子との相互作用

原子を表面近くまで輸送した後に、トラップ光を切り原子集団の時間発展を観測することを考える。原子集団は重力の影響を受け自由落下しつつある初速度でもって広がる。このとき、広がっていく原子集団のうちガラスセルに衝突する原子は急激な温度差（ガラス表面 ~ 300 K、冷却原子 $\sim 50 \mu$ K）を受け、吹き飛んでしまい、原子数のロスとして観測されるだろう。この章では、トラップ原子のガラス表面からの距離と、原子数の減少の関係について、実験と理論両方について述べていく。

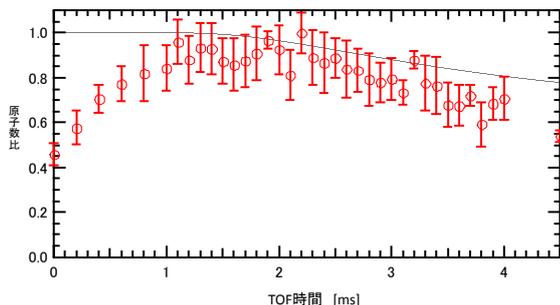


図8 原子数と TOF 時間の関係 実線は理論値
($T=74 \mu$ K 表面からの距離 273μ m)

図8は横軸に TOF 時間、縦軸に原子数の比をとってプロットしたものである。原子数が一番多い点で規格化した。TOF 時間 0 から 1ms の間に原子数が増加しているが、これは吸収イメージングによって原子数を評価する際、原子の密度が高いと probe 光が完全に原子によって吸収されてしまい過小評価につながるためである。また表面からの距離は、以前

の章で触れた評価方法に基づいて算出した。温度は 74μ K である。実線は理論値。表面からの距離 273μ m の点では、原子数の減少が 2 ms 付近から始まることが実験結果から得られた。理論値でも同様に 2 ms 付近からの原子数の減少が見られる。このように、表面からの距離を変えて実験を行った。

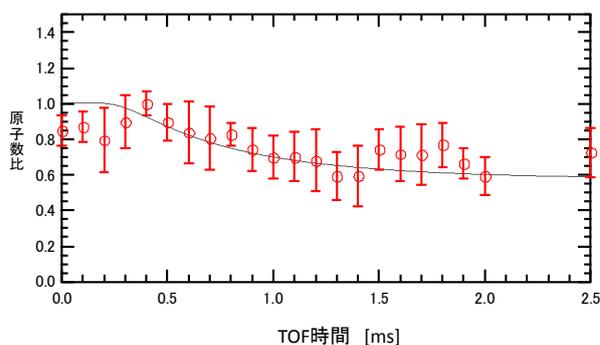


図9 原子数と TOF 時間の関係 実線は理論値
($T=74 \mu$ K 表面からの距離 50μ m)

また図9は表面からの距離 50μ m での実験結果である。開放時間 0.5ms ほどから原子の減少が見られる。以上の結果から原子集団が表面に衝突し、それがロスとして観測結果に表れていることがわかった。

参考文献

- 1 P.Boissel and F.Kerherve opt.commun.37,397 (1981)
- 2 E.Betzig et al.,Science251(1991)
- 3 W.S.Bakr et al., Nature 402 ,74(2009)
- 4 S. Friebe et al., PRA **57**, R20 (1998)
- 5 R. Jauregui, Phys. Rev. A **64**, 053408 (2001).