

低速準安定状態アルゴン原子回折の測定

量子・物質工学科 清水研究室

0623018 山戸 宏太

1. 背景

近年、希ガス原子と固体表面間のファンデルワールスポテンシャル係数 C_3 の測定が行われるようになり、超音速原子ビームを用いて基底状態 He,Ne,Ar,Kr, 準安定状態 He,Ne について実験が行われ係数 C_3 が報告されている。レーザー冷却・トラップ技術の利用により速度が 1m/s 以下の超低速原子ビームの生成が可能になった。超低速原子ビームは微弱なポテンシャルの影響を受けて波の位相が大きく変化するため、表面ポテンシャルの検出に有用である。また超低速原子ビームはド・ブROI波長が数 nm となり、幅が数百 nm のスリット列からなる回折格子からの1次回折角は 10^{-3}rad 以上になる。

我々の研究室では準安定状態 Ar 原子の磁気光学トラップを生成しており、これを原子源として透過型回折格子からの原子波の回折実験を行うことが可能となった。

2. 研究目的

Ar 原子と固体表面とのファンデルワールス相互作用を定量的に測定するため。今回は準安定状態 Ar 原子の磁気光学トラップを生成し、低速の Ar 原子を透過型回折格子に通過させ原子回折パターンを観測することを目的とした。

原子と固体表面とのファンデルワールスポテンシャル V は

$$V = -\frac{C_3}{L^3} \quad (2.1)$$

(C_3 :相互作用係数、 L :原子と固体表面との距離)

で表される。

3. 原理

光が粒子性と波動性を併せ持つように、原子もまた粒子性と波動性を同時に併せ持つ、その波長(ド・ブROI波長) λ_{dB} は

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{mv} \quad (3.1)$$

(h :プランク定数、 m :原子の質量、 v :速度)

と表される。

原子の速度 v は

$$v = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}} \quad (3.2)$$

(k_B :ボルツマン定数、 T :原子温度)

と表される。常温の気体原子の速度は非常に速く、それに伴いド・ブROI波長は非常に短くなる。

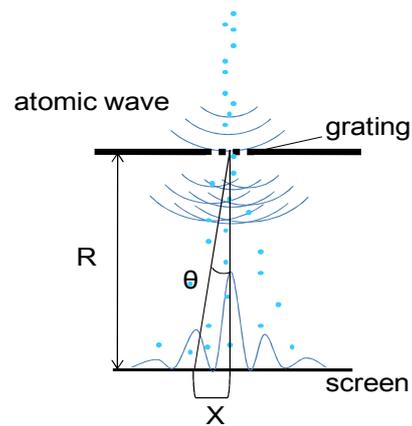


図 1: 相互作用がないときの原子回折

Ar 原子(質量 $m_{Ar} = 6.64 \times 10^{-26} \text{ kg}$)においては原子温度 $T = 300\text{K}$ では速度 $v = 350\text{m/s}$ 、ド・ブロイ波長 $\lambda_{dB} = 28\text{pm}$ であるが、レーザー冷却された Ar 原子では原子温度 $T = 1\text{mK}$ のとき速度 $v = 0.64\text{m/s}$ 、ド・ブロイ波長 $\lambda_{dB} = 16\text{nm}$ になる。

相互作用がないときの原子回折での回折角 θ は、スリット間隔を d 、干渉縞の次数を n としたとき、

$$d \sin \theta = n\lambda \quad (3.3)$$

となり、 $n = 1$ $\theta \ll 1$ のとき

$$\theta \cong \frac{\lambda_{dB}}{d} \quad (3.4)$$

で表される。0 次と 1 次の干渉縞の間隔 X は回折格子からスクリーンまでの距離を R としたとき

$$X = R \tan \theta \quad (3.5)$$

となり、 $n = 1$ $\theta \ll 1$ のとき

$$X \cong R\theta = R \frac{\lambda_{dB}}{d} \quad (3.6)$$

と表される。

Ar 原子は希ガス原子のため装置に付着しにくく、ディテクタにマイクロチャンネルプレート(MCP)を用いることができ、2次元強度分布を容易に観測できる。更に超微細構造がないので光ポンピングしないため、リポンプ光を必要とせず $3p^5 4s^1 J = 2$ から $3p^5 4p^1 J = 3$ 間の冷却波長 811.754nm のレーザー光を用いるだけで冷却・トラップできる。また、波長 912.547nm のトランスファー光で $3p^5 4s^1 J = 2$ から $3p^5 4p^1 J = 1$ に励起させ $3p^5 4p^1 J = 1$ から磁場・光の影響を受けない $3p^5 4s^1 J = 0$ へ自然放出により遷移させることができる。

4. 実験装置

・光学系

波長 811.754nm に周波数ロックしたレーザーを3台のスレイブレーザーに注入同期して電圧をかけレーザーパワーを増幅し、それを冷却・トラップレーザーとして用いる。

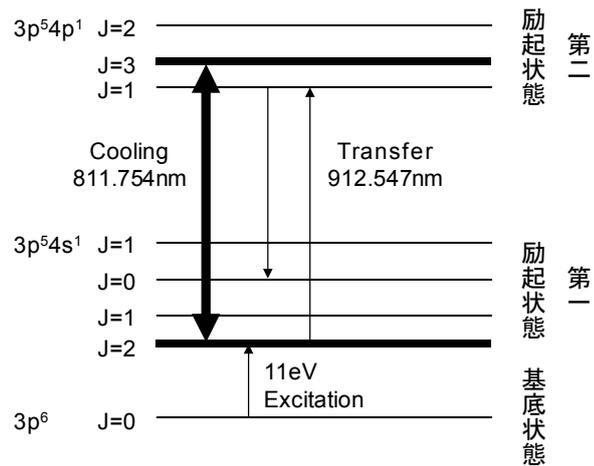


図 2 : Ar 原子のエネルギー準位図

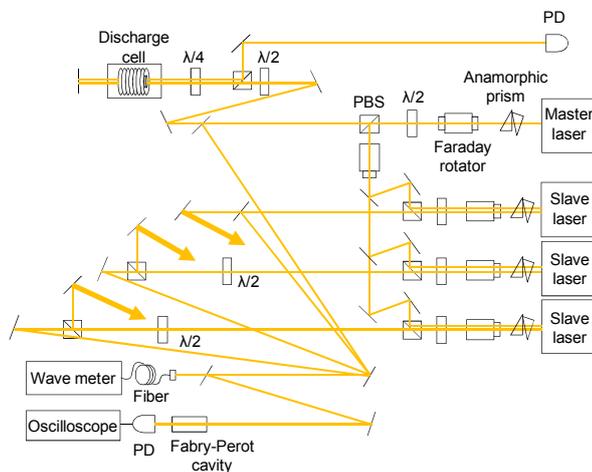


図 3 : 光学系

・真空系

Ar ガスを放電管に注入し放電させ、準安定状態へと励起する。この際 Ar* 原子の最確速度を抑えるため液体窒素で冷却する。ソースチャンバーから発射された Ar* 原子はゼーマンコイル内でゼーマンシフトによるドップラーシフトの補償を受けながらレーザー冷却される。

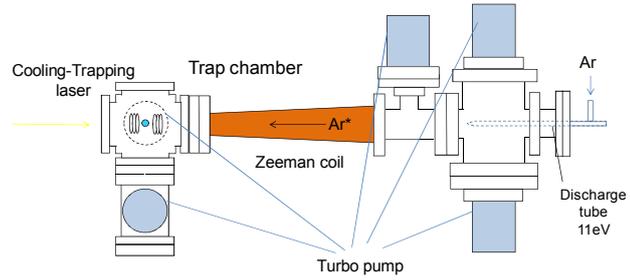


図 4：真空系

・磁気光学トラップ(MOT)

レーザー冷却されながらトラップチャンバーに達した Ar* 原子は 1 本の円偏光のレーザーと 3 本の逆円偏光のレーザーにより、2 つのトラップコイルの中心の磁場勾配がゼロとなる点でトラップされる。

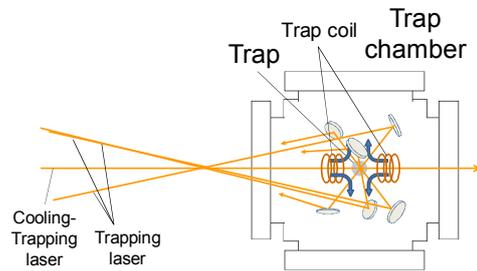


図 5：磁気光学トラップ

5. 回折パターン測定

・実験手順

まず、Ar* 原子の MOT を生成する。

次にトラップの真上から出射したトランスファー光をトラップの中心に集光させ照射し、Ar* 原子の一部をトラップから解放させる。トラップから解放された Ar* 原子は重力により自由落下して真下にある回折格子を通過する。回折格子を通過した原子は MCP 表面に衝突して電子を叩き出し、2 次電子を増幅させ生じた電子によって蛍光板を光らせる。このようにして MCP での原子の位置を記録することができる。

イメージインテンシファイアを取り付けた CCD カメラで蛍光板を撮影し、撮影した画像を 1 時間加算することで回折パターンを観測する。

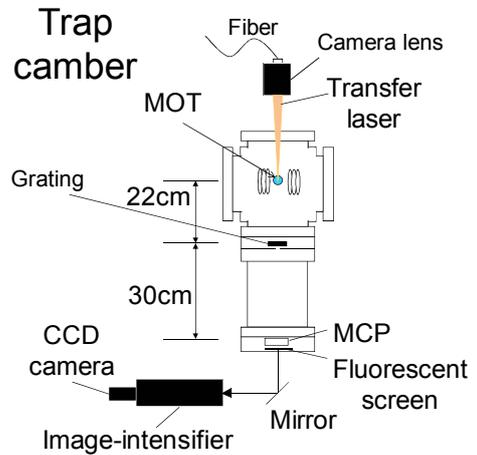


図 6；回折パターン測定装置

トラップでの速度 $v_0 = 0.64m/s$ 、トラップから回折格子までの距離 $R_{ig} = 22cm$ より式(5.1)から

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2gR} \quad (5.1)$$

回折格子での Ar 原子の速度 $v_g = 2.2m/s$ 、ド・ブロイ波長 $\lambda_g = 4.6nm$ となる。1 次回折角 θ_1 は回折格子から検出器までの距離 $R_{gd} = 30cm$ なので相互作用がないとき式(3.2)より $\theta_1 = 4.6 \times 10^{-3} rad$ となり、0 次と 1 次の干渉縞の間隔 X_1 は式(3.4)から $X_1 = 1.4mm$ となる。

・回折格子

回折格子には材質シリコン(Si)、幅12mm、長さ12mm、最大の厚さ1mmの板の中心に材質窒化シリコン(SiN)、幅0.5mm、長さ0.5mmの範囲に深さ100nm、幅0.5 μ m、長さ0.5 μ mのスリットが1 μ m間隔に並んでいる透過型回折格子を使用した。

・結果

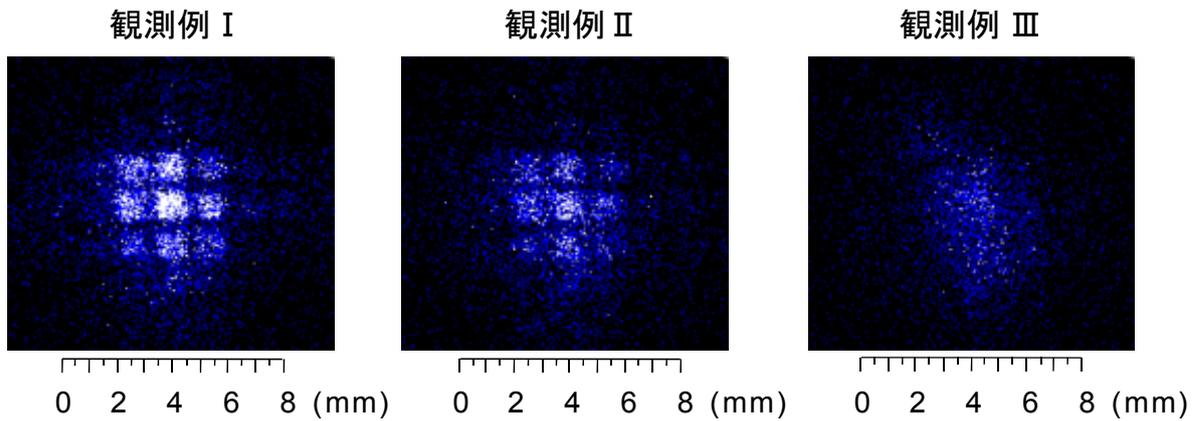


図 7 : 原子回折パターン

	観測例 I	観測例 II	観測例 III
原子数(count)	19000	13000	9000
下流の Trap coil の電流(A) (上流の Trap coil の電流 30A 固定)	3	1	1.3
Transfer 光の強度(mW)	50	50	45

表 1 : 図 7 のデータ

図 7 のような回折パターンを観測することが出来た。

6. まとめ

Ar*原子の MOT を生成し、Ar*原子の MOT を原子源として低速 Ar*原子の回折パターンを観測した。

7. 今後の課題

今後の課題としては

- ・カメラレンズによる焦点の調整とトランスファー光の強度を弱めることで原子源を縮小し、ビジビリティの改善と真空紫外光(VUV)の検出の減少を図る。
- ・回折パターンを解析し、原子と固体表面とのファンデルワールス相互作用の相互作用係数 C_3 を定量的に求める。