

極低温原子を用いた原子干渉計の研究

河野 託也

電子物性工学専攻 清水研究室

2006年 3月

1) 研究目的

博士論文は、レーザー冷却原子を用いた原子干渉計を構築し、その性能の解析と応用実験についてまとめたものである。

2) 研究背景と特長

原子は波動であり回折、干渉というの波の性質を示す。しかし、室温程度の原子のドブロイ波長は数 pm 程度と非常に短く、原子の波動性を実用に用いることは考えられなかった。ところが、1980年代に中性原子のレーザー冷却技術が発明され、それによりドブロイ波長が数 nm から数 μm 程度のアルカリ原子や希ガス原子を利用可能となった。また、微細加工技術により作られる数 μm 程度の周期をもつ透過型回折格子を用いることで原子波を用いた原子干渉計を構成出来るようになった。たとえば、これまでに Mach-Zehnder 型や Talbot-Lau 型の原子干渉計が研究されてきたが、これらの実験では超音速原子源を使用しているため装置が非常に長く、干渉計自体の安定化を必要としてきた。しかし、原子源として冷却原子を用いれば、装置全体を短く構成でき、干渉計自体も頑丈に構成できるうえ、回折格子を用いた干渉計を構成する場合には、格子周期を大きくできることも利点である。本研究では、低速リチウム原子を用いた Talbot-Lau 原子干渉計を構成し、低速で軽い原子を用いることで干渉計をコンパクトに構成でき、かつ安定に動作することを示した。応用実験として、干渉縞鮮明度が光の離調の逆数に比例して変化することを測定し、光干渉計では測定できない光ポテンシャルによる原子波散乱の測定に成功した。また、従来の光干渉計と比べ、原子干渉計の特長は、光に比べ原子は低速であるため光の干渉計では検出できない高感度な計測が可能となりうることである。原子干渉計による高感度計測を可能にするために干渉計を構成する素子も高精度なものが必要になる。原子干渉計による高感度計測を実現するための原子光学素子の一つとして普遍的な固体表面ポテンシャルを利用した量子反射を利用することが考えられ、それを用いた反射型ダブルスリット原子干渉計の実験を行い、量子反射が高感度な原子光学素子として役立つメカニズムであることを実験から示した。

3) 低速原子を用いた Talbot-Lau 原子干渉計の開発

原子光源としてリチウム原子の磁気光学トラップ (MOT) を用いた Talbot-Lau 原子干渉計を構成した。Talbot-Lau 原子干渉計は $10\mu\text{m}$ ピッチの 3 枚の透過型回折格子で構成され、各回折格子間はそれぞれ Talbot 長 3.6cm だけ離し配置した。MOT から見た最も遠方の回

折格子は、 piezo素子が付いたステージ上に乗せられ、原子の進行方向に対し垂直に最大約 30 μ m の変位を得られる。その下方には、干渉計を通過した原子を観測するためのプローブ光を入射し、それによる蛍光をフォトダイオード (PD) で観測する。干渉信号は、回折格子の変位量の関数として干渉計を通過した原子数、つまり、PD 電圧の増減として得られる。本実験で構成した干渉計は、原子光源から検出器までの距離を 22cm と非常に短く、これは既存の同型の干渉計に比べて約 1メートル以上も短い。この干渉計の特徴は、干渉縞鮮明度のドブロイ波長依存性を示すことで、本実験において得られた結果も数値計算で予測された曲線とよく一致した。応用実験として、光ポテンシャルによる原子波散乱の実験を行い、原子が空間的に不均一な光強度を感じることで生じる干渉縞の鮮明度の変化を測定した。

4) 量子反射を利用したダブルスリット原子干渉計の研究

原子は、固体表面の引力ポテンシャル領域において、原子の波長よりも短い距離の間にポテンシャルが急激に変化する場所で反射される。この反射が物質波の量子反射と呼ばれ、これはコヒーレントな反射であり、原子光学素子として応用が可能である。本実験で使用した反射型ダブルスリットの構成はシリコン基板上に作られ、スリット部は原子を良く反射するように回折格子状に加工された表面で、それ以外のところはフラットな表面である。スリットの幅は 0.8mm、スリット間隔は 4.8mm である。スリットの稜線は、各スリットとも 81 個からなっている。稜線幅は、100nm である。原子光源はネオン原子の磁気光学トラップを用いた。反射型 Double-slit は、MOT 位置から 46cm 下に置かれ、さらにその下 51cm にマイクロチャネルプレート (MCP) を置き原子の位置検出を行った。実際に MCP 上の位置 x に得られる干渉パターン $I(x)$ は、シリコン表面全体からの散乱波の大きさの足し合わせで得られるが、本実験では、主に原子はシリコン表面に加工されたスリット部分の稜線の所でのみ反射されると仮定し、得られた実験結果は、予想される干渉パターンと良い一致を得た。

論文は 7 章からなっている。第 1 章では、本研究の研究背景と目的、論文の構成について述べている。第 2 章では、レーザー冷却トラップの原理について述べ、光と中性原子の相互作用について紹介している。第 3 章はリチウム原子磁気光学トラップの生成とその諸特性について紹介している。第 4 章では、これまでに原子光学分野で研究されてきた原子光学素子と原子干渉計について紹介している。第 5 章は冷却リチウム原子を用いた Talbot-Lau 原子干渉計実験の報告である。実験に用いた原子線の生成法、干渉計の構成、データ処理および実験結果について述べている。第 6 章は量子反射を利用したダブルスリット原子干渉計実験の報告である。実験装置、干渉計の構成、および実験結果について述べている。第 7 章は上記の 2 つの実験についてのまとめである。