

第六章 まとめと今後の研究展望

本研究では、ルビジウム原子気体のボース凝縮体を生成し、光定在波による原子波のブラッグ回折現象を利用して凝縮体のマッハ・ツェンダー型干涉計を構成した。光子違い原子間相互作用が存在するボース凝縮体の干涉計がどのような動作をするかは、これまで不明であった。本研究では、平均場（相互作用）エネルギーの96%が運動エネルギーに変換されたボース凝縮体を用いて原子波干涉計を構成し、熱的原子線と同様に動作することが確認された。得られた干涉計のコントラストは100%で、これは原子波干涉計では初めてである。

ボース凝縮体の生成にあたり、本研究では典型的な二重磁気光学トラップを用いたが、上段MOTから超高真空槽内の下段MOTへ原子を輸送するのに原子の重力落下のみを利用している点が新しく、（輸送にガイド磁場やプッシュ光を用いている）他のグループと比べ容易に大量の原子（ $\sim 10^9$ 個）を下段MOTに集めることができた。しかし、一回の輸送効率が悪く（ $\sim 10\%$ ）、ボース凝縮発生に必要な原子を集めるのに2～3分程度かかってしまう点は改善する余地がある。原子の輸送速度を上げる手法として、上段MOTに大量の原子（ $\sim 10^{10}$ 個）を集め（これにはビーム径が広く、かつ飽和強度より十分強いトラップ光を用いればよい）、その原子集団の中心部だけに共鳴したプッシュ光をあて、連続的に原子を下段MOTに輸送する方式などが考えられる[102]。

磁気トラップには、クローバーリーフコイルによる（磁場の極小点がゼロでない）ヨッフエ・プリチャード型の磁場を用いた。このタイプの磁気トラップは、JILAにより開発された回転磁場を用いるTOPトラップと違い、生成された凝縮体の位置安定性がよく、これによりボース凝縮体の干涉計がスムーズに実現できたと考えている。今回用いたコイルの消費電力は約9kWで、コイルの水冷にかなり気を使わなくてはならなかった。近年は消費電力の小さいコイルのコンフィグレーションも開発されおり[103]、BEC生成実験の今後の標準になると思われる。

生成された凝縮体は、概ね理論的予想と矛盾しない諸特性を示したが、トラップから開放された凝縮体のアスペクト比の時間発展に、トーマス・フェルミ近似における理論的予想との系統的差異がみられた。このような差異を報告しているグループは世界で他にはなく、詳しく研究する必要があると思われる。また、様々な条件でボース凝縮体の寿命特性を調べたところ、磁気トラップポテンシャルの勾配（つまりボース凝縮体の密度）によって、加熱レートに大きな違いがあることが確認された。そのメカニズムも未だ解明されておらず、今後の研究課題である。

ボース凝縮体を用いた原子波干涉計において反射率可変ビームスプリッターの役目を果たす光定在波（ブラッグ光）の位相は、光学系のメカニカルな振動（ $\sim 1\text{kHz}$ ）によりランダムに乱されてしまう。このため、今回は干涉計の2つのパスを通る凝縮体が空間的に分離した状態では干涉縞を観測することはできなかった。光学系の振動による光定在波の

位相揺らぎを抑えるには、例えば次のようなフィードバックシステムを構成すればよい。ブラッグ光の光学系を構成するミラーの一つに、位置を動かせるよう圧電素子をつけておく。そしてブラッグ光とは別のレーザー光（例えば He-Ne レーザー光）をブラッグ光と同じ光学系に通し、ブラッグ光と同様に対向させる。適当な場所でこのレーザー光のホモダイン信号をモニターし、その信号をミラーの圧電素子にフィードバックをかければ、光学系の振動を補償することができ、光定在波の位相揺らぎは抑えられる。

位相揺らぎを抑えるもう一つの方法として、単にミラーでブラッグ光を折り返してできる光定在波を用いる方法がある。このとき、（折り返しミラーが振動しなければ）位相は揺らがないが、光定在波は実験室系で静止している。ボース凝縮体が、この静止した光定在波に対してブラッグ条件を満たすよう、別の（交差角が 60° の）ブラッグパルスで $p = \hbar k$ の運動量を凝縮体に与えておけば、干渉計を構成するブラッグパルスとして、静止した（位相の安定した）光定在波を用いることができる。

また、発想を転換して、光学系の振動の時定数より短い時間内でボース凝縮体が完全に分離する程度の大きな運動量をボース凝縮体に与えられれば、パスの分離した干渉計を構成できる。これは、多光子の誘導ラマン散乱過程を用いれば可能である。また、ブラッグ光の周波数差を掃引することにより、凝縮体を高い運動量状態へ断熱的に推移させることもできる。しかし、一般に高次の光学過程を引き起こすには大きな光強度を必要とするので、自然放出の効果によりコヒーレンスが失われる可能性がある。

今回は技術的な理由により、初期の平均場エネルギーが 4% にまで減少した凝縮体を用いて干渉計を実現したが、平均場エネルギーが 100% 残っている凝縮体、つまり磁気トラップされたままの凝縮体を用いても干渉計が実現可能であることが、NIST のグループによって実験的に確認されている [63]*。磁気トラップ内での BEC 干渉計は、BEC の諸特性を調べるツールとして大きな可能性を持っている。例えば、磁気トラップ内での凝縮体の密度は非常に高いので、状態 $|0\rangle$ と状態 $|2\hbar k\rangle$ の凝縮体間の相互作用や、凝縮体が最初の $\pi/2$ パルスにより分配される際の原子数揺らぎ（ショットノイズ）が、凝縮体の相対位相の揺らぎ、つまり干渉計の出力の揺らぎとして検出できると期待される。また、ボース凝縮体の初期状態に応じて分配後の原子数揺らぎの大きさが異なる性質（付録 K）を利用して、干渉計の出力揺らぎの観測を通してボース凝縮体の初期状態（フォック状態やコヒーレント状態など）を推定できる可能性もある。

本実験では、直線偏光のブラッグ光を用いたが、ブラッグ光の偏光状態を適切に選べばボース凝縮体の運動量状態を変えると同時にスピン状態も変えることができるので、磁気トラップ中のボース凝縮体から磁気トラップポテンシャルを感じないスピン状態の凝縮体を任意の割合で取り出すことができる。この技術は、ボース凝縮体の干渉計の応用範囲を大きく広げる。例えば、あらかじめ磁気トラップからボース凝縮体の一部を位相の参照として取り出しておき、ある程度の時間の後に、磁気トラップ中に残っている凝縮体と重ね

* 彼等は磁気トラップポテンシャルの曲率を断熱的に下げ、密度を低くした凝縮体を用いているので、本実験で問題になった凝縮体内におけるブラッグパルス光の屈折の影響（p.57 脚注参照）を受けずに干渉計を構成できたものと思われる。

合わせて干渉させることにより、平均場相互作用による位相回転を観測できる。また、磁気トラップ中の凝縮体に渦を生成し**、これをあらかじめ磁気トラップから取り出しておいた凝縮体と重ねて合わせて干渉させることにより、渦構造を確認することができる。

2つのボース凝縮体間の相対位相を測定する実験は、JILAのグループによっても行われている。彼らは、磁気トラップ中の ^{87}Rb 原子の凝縮体がとり得る2つのスピン状態($|F=1, m_F=-1\rangle$ と $|F=2, m_F=1\rangle$)をマイクロ波とrf磁場の二重共鳴遷移で結合することによりラムゼー干渉計を構成し、それぞれのスピン状態にある凝縮体間の相対位相が100ms以上の時間スケールで保持されることを確認している[35]。しかし、平均場エネルギーによる相対位相のシフトまでは観測していないし、また、相対位相の情報が失われる原因(デコヒーレンスの起源)について定量的な議論はなされていない。一方、MITのグループは、磁気トラップから開放された独立なボース凝縮体間の干渉縞を観測したが[43]、イメージングシステムの分解能の制限により、干渉縞の位置の揺らぎやコントラストに関する定量的な議論はなされていない。このように、ボース凝縮体の位相特性(デコヒーレンスや平均場エネルギーの影響など)に関しては未だに不明な点が多く、今後の大きな研究課題である。

最後に、ボース凝縮体の2光子誘導ラマン遷移による異なる運動量状態間のラビ振動は少なくともラビ振動の周期程度のコヒーレンス時間を持つことが本実験で確認されたが、このようにコヒーレンスの良い二準位系は、量子コンピューターのcontrolled-NOTゲートの実現[105]、シュレーディンガーの猫状態の生成[106]、量子ゼノ効果の検証[107]など様々な応用が期待できる。

** 磁気トラップの磁場を工夫しながら断熱的に切ると、凝縮体に渦が生成されるようにベリー位相を与えられることが理論的に示されている[104]。

