電磁誘起透過の実験的研究

Experimental Research of Electromagnetically Induced Transparency

○石丸昌史[1]、桑本　剛[2]

1. はじめに

物質の光学的性質は、通常二つのエネルギー準位と一つの電磁波で複雑な準位構造であってもたいていは説明できる。しかし、同時にいくつかの励起過程が干渉しあうと常識を超えるような光学的性質が現れる。この干渉を引き起こす基本的な構造は二つの電磁波と相互作用する三つのエネルギー準位である。これを利用したのが電磁誘起透過(Electromagnetically Induced Transparency：以後EITと略す)である。

本研究の目的はRb原子気体のEITを観察するための実験装置を構築し、光の減速を確認することである。さらに我々の研究室ではRb原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)の生成に成功しており、将来的に本研究と組み合わせる事により、量子メモリ実現のための基礎研究を行う。量子メモリは、現在のコンピューターをしのぐ性能をもつとされる量子コンピューターを開発するために必須の技術である。

2. 原理　　EITとは

EITの基本原理を説明するため図1を示す。EITとは3準位系と2つの電磁場の相互作用によって現れる特異な光学現象である。3つのエネルギー準位を持つ原子にプローブ光(強度：弱)とコントロール光(強度：強)という２つの電磁場(光)が同時に照射されていると考える。EIT信号はプローブ光に現れる。コントロール光はちょうど準位｜2＞と｜3＞のエネルギー差の周波数に一致させておく、そこに準位｜1＞と｜3＞のエネルギー差に一致させたプローブ光を照射すると2つの光学遷移の波動関数に干渉が生じる。コントロール光の強度をプローブ光の強度に比べて非常に強くすると本来なら原子はプローブ光を吸収するが、上で述べた量子干渉効果により、原子はプローブ光を吸収しなくなる。つまり、原子はプローブ光を感じることのない暗闇にいることになりプローブ光に対して透明になる。この現象がEITである。

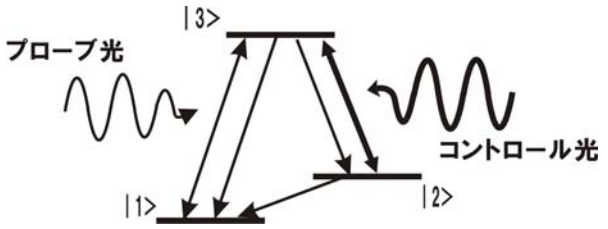

図１　3準位原子のエネルギー準位

また、EITが生じている周波数領域では屈折率が光の周波数変化に対して急激に変化する。光の群速度Vgは

$$Vg = \frac{c}{n + \omega(dn/d\omega)}$$

で表され(c：光速、ω：角速度、n：屈折率) 分散(dn/dω)が大きいと群速度が遅くなることがわかる。これにより光の群速度の大きな減少が生じる。

3. ^{87}Rb原子について

本実験では今後のBECへの応用を考慮し、^{87}Rbを用いた。本実験に関係する^{87}Rbの準位構造を図2に示す。実験はD1線と呼ばれる$5S_{1/2}$→$5P_{1/2}$の遷移（遷移波長795nm）で行う。Fはそれぞれの超微細準位の角運動量子数である。EITの観測においてコントロール光は｜F=2＞→｜F’=2＞遷移(波長：794.985nm)にプローブ光は｜F=1＞→｜F’=2＞の遷移(波長：794.970nm)にレーザー周波数を合わせる。

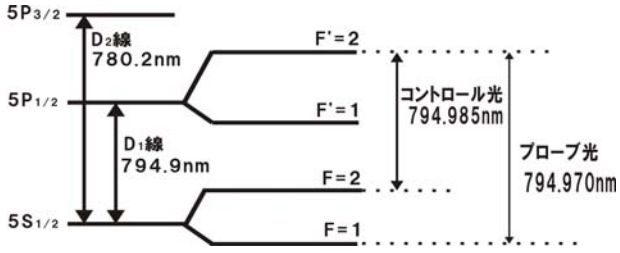

図２　^{87}Rbの準位構造

[1]日大理工・院・量子　[2]日大・量科研

4. 実験

実験に使用する光学系を図 3 に示す。レーザー光はλ/2 波長板と偏光ビームスプリッター(PBS)によって必要に応じて分割している。レーザー制御系に進んだレーザー光は波長計やファブリペロー干渉計、周波数安定化装置につながっている。また、Rb セルはペルチェ素子を用いて温度制御している。コントロール光とプローブ光は Rb セル手前の PBS によって同軸上に重ねられセルに入射される。セルを通過した 2 つのレーザー光は PBS によって分割されプローブ光のみ光検出器（PD）によって検出される。

また、プローブ光パルス波の減速の実験を行うために音響光学素子（AOM）を使用し、一次回折光のみをパルス波とし Rb セルに入射させる。EIT スペクトルの観測時は連続波として実験を行う。

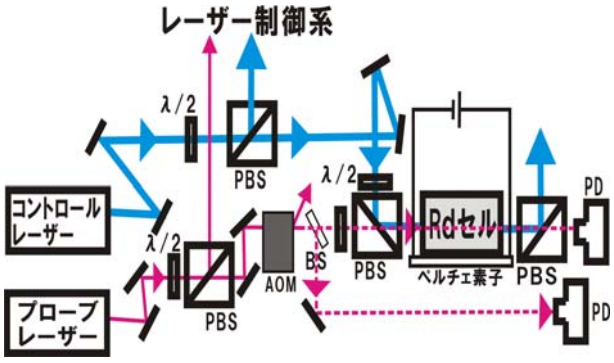

図 3　光学系の略図

PBS:偏光ビームスプリッター　BS:ビームスプリッター
PD：ディテクター　AOM：音響光学素子

5. 実験結果

図 4(a)に観測された EIT スペクトルを示す。ブロードなラインはプローブ光の通常の吸収であり、この吸収スペクトルの底に見える鋭いピークが EIT を示す信号である。今回観測できた最大透過率は約 80%であった。この時のプローブ光のパワーは 1.67 μW であり、コントロール光のパワーは 17.5mW であった。図 4(b)に比較のためにコントロール光を照射してない場合のプローブ光の吸収スペクトルを示す。プローブ光のパワーをコントロール光のパワーよりかなり低くし 2 つのレーザーが Rb セル中でうまく重なるように調整すれば EIT は比較的簡単に確認できた。

また、パルス波の減速も確認できた。パルス波の遅れは他の研究から数 100ns 程度であると予想したが、実際パルス波の遅れは 100[ns]程度であった。遅れが小さい理由としてはコントロール光のレーザーの周波数揺らぎが EIT スペクトル線幅より大きいためであると考えられる。また Rb セルの温度を 60 度程度にすると遅れを確認するのが容易になった。

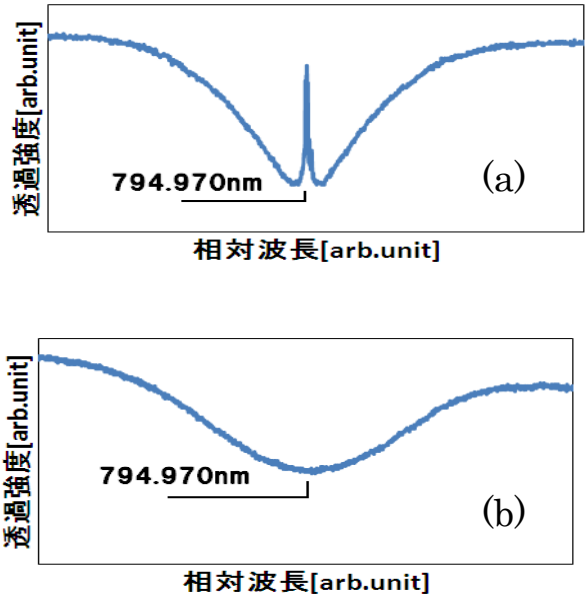

図 4　観測された EIT 吸収スペクトルおよびコントロール光なしでのプローブ光吸収スペクトル

6. まとめと課題

^{87}Rb において電磁誘起透過を観測することに成功した。今回は最大約 80%の透過率を達成したが安定的にこの値を出すのは困難であった。レーザー周波数安定化装置の改善が必要である。より安定した EIT の実現とパルスの遅れを確認することが今後の課題である。本研究を発展させ光の Rb 原子へ閉じ込めを実現する。

参考文献

[1]北野正雄、中西俊博、「風変わりな光たち」、応用物理　第 72 巻　第 6 号（2003）
[2]S.E.Harris, Phys.Rev.Lett.70,522(1993)
[3]L.V.ハウ、「量子が見せる超常識の世界　テレポーテーションから量子コンピューターまで」、別冊日経サイエンス、P48「凍りついた光」