

量子干渉効果を用いた原子時計

(熊本大院自然科学) ○光永正治・司城宏太郎・播広屋和貴

Atomic Clocks by using Quantum Interference Effects
(Kumamoto Univ.) Masaharu Mitsunaga, Kotaro Shijo, Kazuki Harimaya

Abstract: Quantum interference effects such as electromagnetically induced transparency, Raman Ramsey fringes, and N-type resonances are investigated in sodium atomic vapor and their applications to compact atomic clocks are discussed.

アルカリ原子のようなラムダ型 3 準位系を有する媒質と、複数のモードの光波の系は、電磁誘導透過 (Electromagnetically induced transparency: EIT) に代表される量子干渉効果をもたらし、さまざまな研究がなされ、例えば、超低速パルス伝搬 [1]、光情報記録 [2]、量子通信 [3]、パラメトリック増幅 [4] 等の現象が報告されている。さらにこの系は、コンパクトで安価な原子時計への応用が期待されており、実際に、市販されている例もある。従来の原子時計は、マイクロ波を用いることで、デバイスサイズがマイクロ波共振器により制限されていたのに比べ、EIT を用いた原子時計は all-optical であることから、サイズの制限を受けず、よりコンパクトな製品が期待されている。このような量子干渉効果を用いたデバイス製作のためには、製品開発のみならず、EIT の現象そのものを十分理解し、信号の励起光強度依存性やバッファガス依存性、原子密度依存性等を基礎物理の立場から詳細に解析しなければならない。我々は、ナトリウム原子蒸気を試料として用い、代表的な量子干渉効果としての EIT、ラマンラムゼー干渉 (Raman Ramsey fringes: RRF) [5], N 型共鳴 (N-type resonance: NTR) 等の現象に関して、(特に ac シュタルクシフトをもたらす励起光強度依存性について) 詳しく調査したので報告する。

最初に、 Λ 型 3 準位系と 2 光波の相互作用について復習しよう (図 1 参照)。この場合の準位 1 と 2 は、アルカリ金属の場合、基底状態 (S 準位) の超微細分裂に相当し、クロック遷移と呼ばれ、この分裂周波数が周波数標準となる。準位 3 としては、光励起の P 準位を用いる。EIT の場合、probe 光と coupling 光という、周波数差が超微細分裂周波数に等しい、2 つの光を照射することで、系をいわゆる「暗状態」に陥らせることができ、準位 1, 2 間には強いコヒーレンスができる。このとき、プローブ光は透明化し、EIT 信号が観測される。EIT の線幅は極めて狭いことから、周波数標準、あるいは原子時計として応用可能である。

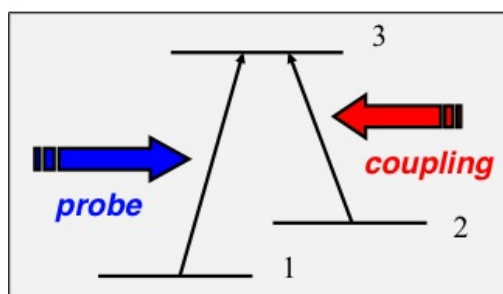


図 1. 3 準位系と 2 光波 (probe 光と coupling 光) の相互作用

EIT 原子時計の重大な弱点の一つは、励起光強度依存性である。これは、光シフト、あるいは ac Stark shift と呼ばれ、励起光強度が強くなると、準位 1 あるいは 2 がシフトし、結果的に時計遷移周波数がずれてしまう現象である。このため、励起光強度のゆらぎにより、クロック周波数がゆらいでしまう。我々はその挙動を詳しく解析した。図 2 にその実験配置図を示す。単一周波数リング色素レーザーを probe 光と coupling 光の 2 つのビームに分割し、ナトリウムセルに照射する。この 2 つのビームの差周波数の関数として透過光強度をモニターし、EIT 信号を得る。図 3 に結果を示すが、EIT の場合、励起光強度とともにピークが高

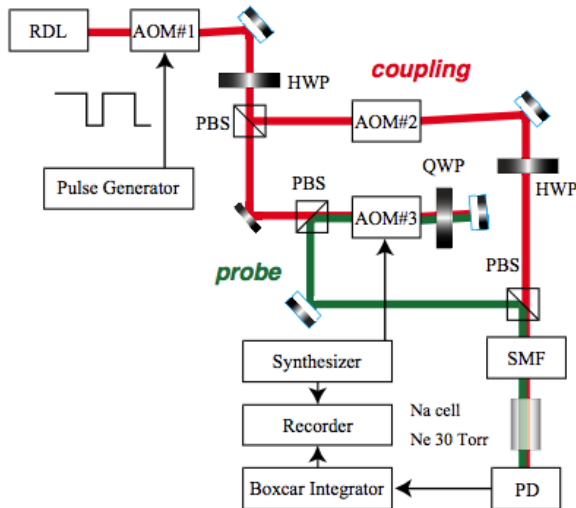


図2 EITあるいはRRFの実験配置図

周波側にシフトし、幅も広がっていく様子がわかる。これに対し、励起光をパルス化し、そのパルス前半のみをゲートをかけて検出するRRFという手法を用いたのが下図であるが、この場合は、フリンジピークがシフトすることは無く、極めて安定度の高い時計となりうる事がわかった。さらに、信号線幅も、パルス間隔を長くすることで、任意に狭くする事ができ、高い分解能のクロック信号が得られる。

さらに最近の研究においては、EITとまったく同じ実験配置を用い、単に吸収スペクトルの低周波数側をモニターする事による、N型共鳴(NTR)という新しいタイプの信号が有望である事が判明した。これは、図1の配置から、さらにprobe、couplingをクロック周波数分だけ低周波数側にシフトした配置になっており、この場合でも鋭い共鳴信号が(透過型ではなく吸収型であるが)観測される事がわかっている。また、このNTRの場合は、probe、couplingの強度比をうまく調整する事で、上述した光シフトを抑制できることが理論的にも実験的にもわかってきた[6]。NTRの場合は、RRFと異なり、励起光をパルス化する必要もない事から、極めて簡便な原子時計になり得る期待が持てる。講演においては、EIT、RRF、NTRの原理と応用、観測方法、長所、短所、将来の展望に関して概括する。

参考文献：

[1] L.V.Hau, S. E. Harris, Z. Dutton, and C. H. Behroozi, *Nature* **397**, p. 594 (1999).
 [2] C. Liu, Z. Dutton, C. H. Behroozi, and L. V. Hau, *Nature* **409**, p. 490 (2001).
 [3] L. -M. Duan, M. D. Lukin, J. I. Cirac, and P. Zoller, *Nature* **414**, p. 413 (2001).
 [4] K. Harada, K. Mori, J. Okuma, N. Hayashi, and M. Mitsunaga, *Phys.Rev.* **A78**, 013809 (2008).
 [5] I. Yoshida, N. Hayashi, K. Fujita, S. Taniguchi, Y. Hoshina, and M. Mitsunaga, *Phys. Rev.* **A787**, 023836 (2013).
 [6] I. Novikova, D. F. Phillips, A. S. Zibrov, R. L. Walsworth, A. V. Taichenachev, and V. I. Yudin, *Opt. Lett.* **31**, 622 (2006).

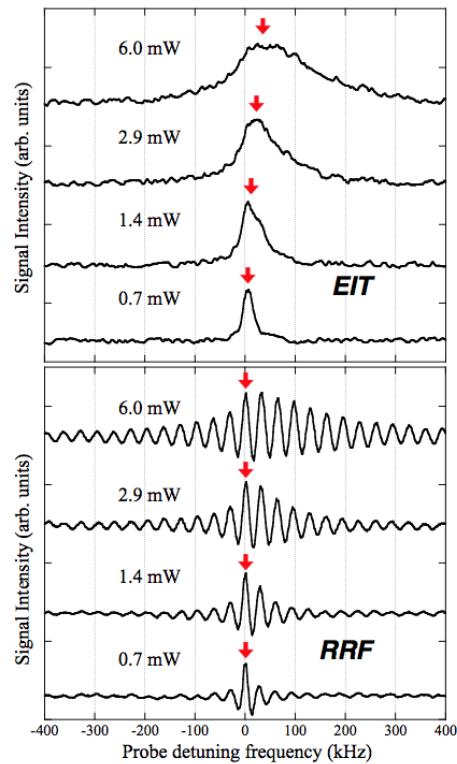


図3 EIT信号(上図)とRRF信号(下図)の励起光強度依存性