

Quantum Optics Chapter 7

理学系研究科 物理学専攻 坪野研究室 修士課程 1年 道村唯太

2010年7月9日

訂正: 7月19日

7 Lasing without inversion and other effects of atomic coherence and interference

量子コヒーレンス、量子相関の結果.....

Hanle 効果、量子ビート、光子エコー、自己誘導透過、コヒーレント Raman ビート

捕捉状態、反転分布を持たないレーザー発振、吸収を無くすことによる反射率の増加、電磁誘起透明化

原子コヒーレンス、原子干渉による吸収の相殺が本質

7.1 The Hanle effect

弱い磁場中の原子群を、 \hat{x} に偏極した光で励起すると、再放射光には \hat{y} に偏極したものも含まれる。
励起光によって生じる双極子モーメントは

$$\langle \mathbf{P}(t) \rangle = p \cos \nu t (\hat{x} \cos \Delta t + \hat{y} \sin \Delta t) \quad (7.1.7)$$

ここで Δ は磁場による準位の分裂。

磁場なし、つまり $\Delta = 0$ では \hat{x} 偏極の光しか再放射されないし、 x 軸方向に再放射されない。有限の Δ では \hat{y} 偏極成分が含まれ、 x 軸方向にも再放射される。

太陽彩層の磁場測定に使われ始めているらしい。(Zeeman 効果と違って弱い磁場でもいい (mG ~ 10²G))

7.2 Coherent trapping - dark states

3 準位原子 (Λ 形、図 7.2) が 2 モード場と相互作用している系のハミルトニアンは回転波近似 (cf. 5.2 節) で

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_0 + \mathcal{H}_1 \quad (7.2.1)$$

$$\mathcal{H}_0 = \sum_{i=a,b,c} \hbar \omega_i |i\rangle \langle i| \quad (7.2.2)$$

$$\mathcal{H}_1 = -\frac{\hbar}{2} (\underbrace{\Omega_{R1} e^{-i\phi_1} e^{-i\nu_1 t}}_{\text{複素 Rabi 周波数}} |a\rangle \langle b| + \underbrace{\Omega_{R2} e^{-i\phi_2} e^{-i\nu_2 t}}_{\text{複素 Rabi 周波数}} |a\rangle \langle c|) + \text{H.c.} \quad (7.2.3)$$

ただし、 $\underbrace{\hspace{2cm}}$ は複素 Rabi 周波数。

原子の波動関数は

$$|\psi(t)\rangle = \sum_{i=a,b,c} c_i(t) e^{-i\omega_i t} |i\rangle \quad (7.2.4)$$

初期状態をコヒーレントな下位準位の重ね合わせ

$$|\psi(0)\rangle = \cos(\theta/2) |b\rangle + \sin(\theta/2) e^{-i\psi} |c\rangle \quad (7.2.8)$$

として確率振幅 $c_i(t)$ を求めると (7.2.9)-(7.2.11) だが、

$$\Omega_{R1} = \Omega_{R2}, \quad \theta = \pi/2, \quad \phi_1 - \phi_2 - \psi = \pm\pi \quad (7.2.12)$$

の条件の下では $c_a(t) = 0$ になる \rightarrow 下位準位に *trap* された。場があるのに吸収がない。
Rabi 周波数を断熱的に on-off すると時間依存する捕捉状態 (7.2.14) を作れる (\rightarrow Problem 7.2)。
この節では原子が $t = 0$ で暗状態にある場合を考えだが、そうでなくても捕捉は起こりうる (\rightarrow 次節)。

7.3 Electromagnetically induced transparency

図 7.3 のような 3 準位原子系を考える。

上の 2 準位を強いコヒーレント場 (ν_μ) でカップルすると、ある条件下でプローブ場 (ν , 振幅 \mathcal{E}) に対して透明 (吸収ゼロ) となる \rightarrow 電磁誘起透明化 (EIT)。

相互作用ハミルトニアンは (7.2.1)-(7.2.3) と同じ。ただし¹

$$\Omega_{R1} e^{-i\phi_1} e^{-i\nu_1 t} \rightarrow \frac{\mathcal{E} \rho_{ab}}{\hbar} e^{-i\nu t}; \quad \Omega_{R2} e^{-i\phi_2} e^{-i\nu_2 t} \rightarrow \Omega_\mu e^{-i\phi_\mu} e^{-i\nu_\mu t} \quad (7.3.1)$$

に変える。

密度行列要素の各運動方程式は (7.3.2)-(7.3.4)。

分散と吸収は $\rho_{ab}^{(1)}$ で決まる (\mathcal{E} の最低次まで計算すればよい)。強い Ω_μ の項は全オーダー計算する。
全原子は $|b\rangle$ にいるという初期条件

$$\rho_{bb}^{(0)} = 1, \quad \rho_{aa}^{(0)} = \rho_{cc}^{(0)} = \rho_{ca}^{(0)} = 0 \quad (7.3.5)$$

で解いていく.....

\rightarrow (7.3.13)

複素分極率 \mathcal{P} の定義 (5.4.18) と関係式 $\mathcal{P} = \epsilon_0 \chi \mathcal{E}$ より複素分極率 $\chi = \chi' + i\chi''$ は

$$\chi' = \frac{N_a |\rho_{ab}|^2 \Delta}{\epsilon_0 \hbar Z} [\gamma_3 (\gamma_1 + \gamma_3) + (\Delta^2 - \gamma_1 \gamma_3 - \Omega_\mu^2 / 4)] \quad (7.3.14)$$

$$\chi'' = \frac{N_a |\rho_{ab}|^2}{\epsilon_0 \hbar Z} [\Delta^2 (\gamma_1 + \gamma_3) - \gamma_3 (\Delta^2 - \gamma_1 \gamma_3 - \Omega_\mu^2 / 4)] \quad (7.3.15)$$

ここで N_a は原子数。離調 $\Delta = \omega_{ab} - \nu$ 。 γ_1 , γ_2 , γ_3 はそれぞれ ρ_{ab} , ρ_{ac} , ρ_{cb} の崩壊率。 Z は

$$Z = (\Delta^2 - \gamma_1 \gamma_3 - \Omega_\mu^2 / 4)^2 + \Delta^2 (\gamma_1 + \gamma_3)^2 \quad (7.3.16)$$

(5.4.23) と (5.4.24) から χ' と χ'' はそれぞれ分散と吸収に関係。

$\Omega_\mu = 2\gamma_1$, $\gamma_1 \gg \gamma_3$ としてプロットしたのが図 7.4。 $\Delta = 0$ では χ' も χ'' も 0 になる \rightarrow 屈折率 1, つまり透明。
前節では最初から暗状態だったが、EIT では強いポンプ光と弱いプローブ光によって原子が暗状態にポンプされる。(初期条件は暗状態としたが、これが続くという形で捕捉されているわけではない)

??? 図 7.5 はよくわかりません。

¹ ϕ は $\backslash wp$ みたいです。

7.4 Lasing without inversion

通常は下位準位からの吸収があるため反転分布が必要だが、吸収を相殺できたら？ →LWI が可能！

7.4.1 The LWI concept

7.2 節と同じ系を初期条件

$$c_a(0) = 1, \quad c_b(0) = c_c(0) = 0 \quad (7.4.7)$$

の下で解くと、吸収の相殺条件 (7.2.12) の下では

$$c_a(t) = \cos\left(\frac{\Omega t}{2}\right), \quad c_b(t) = i \frac{\Omega_{R1}^*}{\Omega} \sin\left(\frac{\Omega t}{2}\right), \quad c_c(t) = i \frac{\Omega_{R2}^*}{\Omega} \sin\left(\frac{\Omega t}{2}\right) \quad (7.4.8 \sim 10)$$

ここで $\Omega = (\Omega_{R1}^2 + \Omega_{R2}^2)^{1/2}$ 。 $\Omega t \ll 1$ とすると放出確率は

$$|c_b(t)|^2 + |c_c(t)|^2 = \frac{\Omega^2 t^2}{4} (> 0) \quad (7.4.12)$$

反転分布がなくても放出。