

【序】レーザーを用いた量子系の準位分布制御方法として、2準位系における Rabi 振動を利用した  $\pi$ パルス制御、3準位系の断熱通過現象を利用した STIRAP (stimulated Raman adiabatic passage) などが広く知られている。しかし、一般的な多準位系において簡便な量子制御の描像は確立されていない。本研究では、多準位系に対して、① 見かけ上相互作用しない少数準位からなる部分系に分割されるようなレーザー照射の条件を求め、② 孤立化された部分系に対して従来の制御法を適用する、という手順に従って強レーザーを用いた新たな量子制御描像を構築した。

【理論】多準位系の一例として、枝分かれ型4準位系を考える(図1参照)。準位 $|A_1\rangle$ と $|A_2\rangle$ の間には直接的な光学遷移が許されていない。一方で、準位 $|B_1\rangle$ と $|B_2\rangle$ は強レーザー場による強い相互作用 $\Omega$ で、 $|A_1\rangle$ と $|A_2\rangle$ は $|B_1\rangle$ のみと共鳴からのずれが $\Delta$ であるレーザーとの弱い相互作用 $V_1$ 、 $V_2$ を通してそれぞれ結合している。また、 $|B_1\rangle$ と $|B_2\rangle$ にはそれぞれ緩和定数 $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_2$ で表される緩和過程が存在している。今、中間状態 $|B_1\rangle$ と $|B_2\rangle$ の緩和過程による分布損失を最小限に抑えながら、初期状態 $|A_1\rangle$ から目標状態 $|A_2\rangle$ へ準位分布を移動させる量子制御を考える。

全系のハミルトニアンはレーザー場を量子化した描像の下で、

$$\mathbf{H}_{B4} = \begin{pmatrix} \Delta & 0 & V_1 & 0 \\ 0 & \Delta & V_2 & 0 \\ V_1 & V_2 & -i\Gamma_1 & \Omega \\ 0 & 0 & \Omega & -i\Gamma_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

と書ける。 $V_1$ 、 $V_2$ を摂動とみなし、2次までの縮退系の摂動論を適用することにより、A空間とB空間が見かけ上分離される条件 $\Omega \gg V_1, V_2, \Delta, \Gamma_1, \Gamma_2$ 、及びその条件の下でA空間における動力学を支配する $2 \times 2$ 有効ハミルトニアン行列

$$\mathbf{H}_{B4}^{(\text{eff})} = \begin{pmatrix} \Delta & 0 \\ 0 & \Delta \end{pmatrix} + \frac{(\Delta + i\Gamma_2)}{(\Delta + i\Gamma_1)(\Delta + i\Gamma_2) - \Omega^2} \begin{pmatrix} V_1^2 & V_1V_2 \\ V_1V_2 & V_2^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

が得られる。(2)式はこの系が擬似2準位系として取り扱い可能であり、 $\pi$ パルスによる分布制御が適用可能であることを示唆している。さらに、 $\Omega \gg \Delta, \Gamma_1, \Gamma_2$ の条件の下では(2)式の $\Gamma_1$ 依存性がなくなるため、長寿命( $\Gamma_2 \approx 0$ )の状態を $|B_2\rangle$ として選択し $|B_1\rangle$ と $|B_2\rangle$ を強レーザー場で結合することによって $|B_1\rangle$ からの緩和過程に起因する分布損失を抑制することが出来る。

【結果】図2はレーザーパラメーターを $V_1 = V_2 = 1 \hbar\omega$ 、 $\Omega = \Delta = 0$ と設定し、中間状態 $|B_2\rangle$ を利用せず系を $|A_1\rangle$ 、 $|B_1\rangle$ 、 $|A_2\rangle$ からなる $\Lambda$ 型3準位系として取り扱った場合の準位分布の時間発展である。(但し、 $\omega$ は $|A_1\rangle - |A_2\rangle$ 間の遷移振動数)。34%の分布が $|B_1\rangle$ の緩和過程によって消失し、最終的な収率は60%程度にとどまっている。一方で、図3に

分離の条件 $\Omega \gg V_1, V_2, \Delta, \Gamma_1, \Gamma_2$ を満たすパラメータ値、 $V_1 = V_2 = 1 \hbar\omega$ 、 $\Omega = 10 \hbar\omega$ 、 $\Delta = 0.1 \hbar\omega$ の下での準位分布の動力学を示す。分布は $|A_1\rangle$ と $|A_2\rangle$ の間を移動しB空間へ遷移していないことから、強レーザー場を用いた多準位系の分割が上手く働いていることがわかる。また、A空間に生成する2準位系の Rabi 振動の半周期に相当する $t = 320\omega^{-1}$ 付近で準位分布は $|A_2\rangle$ にほぼ移動している。これは、前述の強レーザー場の効果により $\Gamma_1$ の影響が抑制され高収率な量子制御が実現されたことを示している。

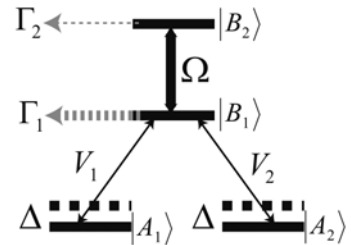


図1 枝分かれ型4準位系

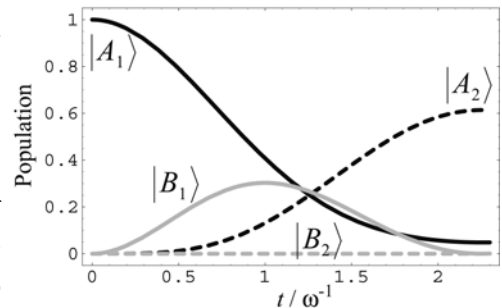


図2 系の分割が不十分な場合の準位分布の動力学

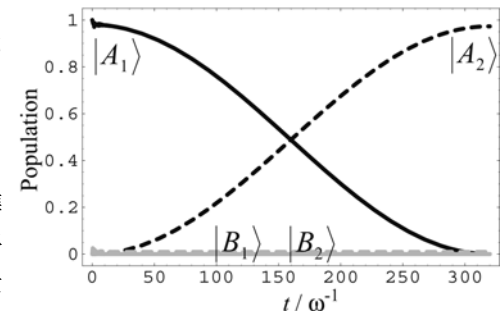


図3 系の分割が十分な場合の準位分布の動力学