

定常レーザー場における多準位系の分布動力学の解析と制御

(慶大院理工) ○玉木麻耶, 菅原道彦, 藪下聡

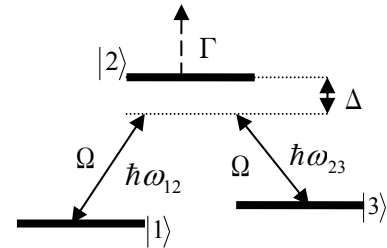
【序】

レーザー技術の発展とともに、量子制御のためのレーザー場設計が注目を集めている。本研究では、 Λ 型 3 準位系における光学遷移をドレスト描像を用いて解析し、目的の量子状態を得るためのレーザー場の理論設計を行った。さらに擬 Kobrak-Rice 型 5 準位系¹の分布挙動を解析し、前述の制御法による分布制御を試みた。

【理論】

<< Λ 型 3 準位系の分布制御>>

図 1 に示す Λ 型 3 準位系において、量子状態の分布制御を目的としたレーザー場の設計を行った。 $|1\rangle, |3\rangle$ は電子基底状態の準位、 $|2\rangle$ は電子励起状態の準位を表し緩和 Γ が存在するものとする。この系では、 $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 間、 $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ 間の光学遷移が許されているが、 $|1\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ 間での遷移は禁制である。また 2 種類のレーザー場と系の相互作用強度を Ω とし、共鳴からのずれ Δ が共に等しくなるように、角振動数 ω_{12}, ω_{23} は調節されているものとする。以上の条件下で、初期準位 $|1\rangle$ から標的準位 $|3\rangle$ へ短時間高収率で移行させる矩形型レーザー場を設計した。

図 1 Λ 型 3 準位系

準位分布の時間依存性を調べるために、ドレスト描像を用いてハミルトニアンをレーザー場の時間変化に依存しない形に書き換え、シュレディンガー方程式の解析解を求めた。時刻 t における各準位 $|i\rangle$ の存在確率 $P_i(t)$ は次式に示すように 3 種類の振動項と 1 種類の非振動項の和で表されることがわかった。

$$P_i(t) = \text{base}_i(t) + A_i(t) \sin\{at + \delta_a\} + B_i(t) \sin\{bt + \delta_b\} + C_i(t) \sin\{ct + \delta_c\} \quad \dots(1)$$

$$i = 1, 2, 3 \quad a > b > c > 0$$

(1) 式の振動項に着目して Δ の変化を用いた制御方法を開発した。2 つの振動項 $A_i(t) \sin\{at + \delta_a\}$ と $C_i(t) \sin\{ct + \delta_c\}$ の位相が合致するように Δ を調節することで大きな確率の変動を作り出し、分布が最大になるところでレーザー照射を止めて高収率を狙う手法を **Type A** とした。また緩和によって振幅 $A_i(t), B_i(t), C_i(t)$ は減衰するが、 Δ を十分大きくすると $C_i(t)$ の減衰のみが抑えられる事を利用して、確率 $P_3(t)$ を単一の振動項 $C_3(t) \sin\{ct + \delta_c\}$ だけにし、この振動のみで標的準位 $|3\rangle$ の分布動力学が表現できるようにする手法を **Type B** とした。

<<擬 Kobrak-Rice 型 5 準位系の分布挙動の解析>>

強光子場での擬 Kobrak-Rice 型 5 準位系(図 2)の分布動力学解析を行った。図 2 で $|1\rangle$ は電子基底状態、 $|2\rangle, |3\rangle, |4\rangle, |5\rangle$ は電子励起状態を表し、 $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 間、 $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ 間、 $|2\rangle \leftrightarrow |4\rangle$ 間、 $|3\rangle \leftrightarrow |5\rangle$ 間、 $|4\rangle \leftrightarrow |5\rangle$ 間の光学遷移が許容である。変数 c, d, f, g は、 $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 間の遷移を可能にするレーザー場と系との相互作用強度 Ω を基準とした場合のレーザー強度比を示している。本研究では、初期準位を $|1\rangle$ 、標的準位を $|3\rangle$ として、5 準位系中に本来禁制である遷移を含む擬 Λ 型 3 準位系 (以下飛び

¹ K. Bergmann, H. Theuer, and B. W. Shore, Rev. Mod. Phys. **70**, 1003 (1998)

石型遷移と呼ぶ) を作り出し,先に述べた Λ 型 3 準位系の制御方法を施すことを目的とする。

ハミルトニアン(2)の固有値問題によって得られた 5 つのドレスト状態とそれに対応する振動数の振る舞いから,ドレスト状態は 1 つの孤立ドレスト状態と 2 組のペアのドレスト状態に分類できることが分かった。孤立ドレスト状態とペアのドレスト状態 1 組を組み合わせて,これらが見かけ上 Λ 型 3 準位系を構成し,残りのペアのドレスト状態が擬 2 準位系の振る舞いをするようなレーザー強度比の条件を明らかにしたところ,中間準位は $|5\rangle$ でなければならないことが分かった。初期準位 $|1\rangle$, 中間準位 $|5\rangle$, 標的準位 $|3\rangle$ の擬 Λ 型 3 準位系を作り出すレーザー強度比の条件は(3),(4)に示される 2 種類存在することが分かった。

$$\text{条件 I } g \approx 1, df \gg 1, c \gg 2, d \gg \sqrt{2}, f \ll c \quad \dots(3)$$

$$\text{条件 II } c \approx df(g-1), c \gg 1+g, dg \gg \sqrt{2}, f \ll c \quad \dots(4)$$

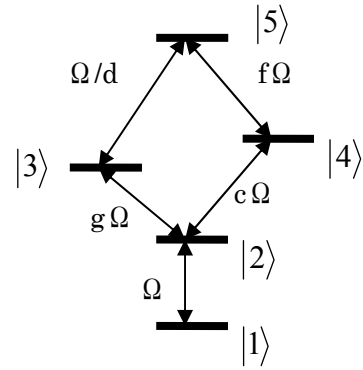


図 2 擬 Kobrak-Rice 型 5 準位系

$$\mathbf{H} = \Omega \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & g & c & 0 \\ 0 & g & 0 & 0 & 1/d \\ 0 & c & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & 1/d & f & 0 \end{pmatrix} \quad \dots(2)$$

【結果】

<< Λ 型 3 準位系の分布制御>>

2つの手法を用いた場合の 3 準位系での計算結果より, **Type A** の手法は高い振動数のコヒーレント振動項を利用する為, **Type B** に比べ短時間で遷移を行うことができる。しかし緩和 Γ が Ω に対して大きくなると, 位相合わせの対象となるコヒーレント項が緩和によって減衰してしまうため **Type A** は使用できなくなる。一方の **Type B** は, $C_i(t) \sin\{ct + \delta_c\}$ が Γ に対して減衰しにくい為, コヒーレント振動の減衰を抑制させることができる。以上の考察より, Γ が Ω に対して相対的に小さい場合は **Type A** を, 反対に大きい場合は **Type B** を用いるとよいことがわかった。

<<擬 Kobrak-Rice 型 5 準位系の分布挙動の解析>>

すべての相互作用が等しくなるようにレーザー強度比を取った場合と, 飛び石型遷移を促すレーザー強度比の **条件 I** を施した時の 5 準位系分布挙動の数値実験による結果を図 3 に示す。(a) では主に $|1\rangle \leftrightarrow |5\rangle$ 間の遷移が $|2\rangle$ を経由して行われているが, $|3\rangle, |4\rangle$ の分布も存在する。それに対して,

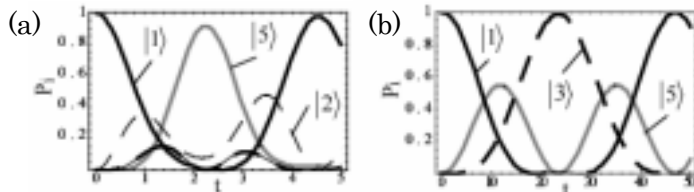


図 3 5 準位系の存在確率の時間変化

$$\Omega=1 \quad (a)c=d=f=g=1 \quad (b)\text{条件 I } c=10^3, d=10^2, f=10^2, g=1$$

$|1\rangle$: 太実線, $|2\rangle$: 細点線, $|3\rangle$: 太点線, $|4\rangle$: 細実線, $|5\rangle$: 灰色実線

して, (b) では $|2\rangle, |4\rangle$ に分布がなく, 分布挙動は初期準位 $|1\rangle$, 中間準位 $|5\rangle$, 標的準位 $|3\rangle$ としたときの Λ 型 3 準位系のものと類似している。 **条件 II** を施した場合の分布も (b) と同様の振る舞いをした。以上より, **条件 I**, **条件 II** によって擬 Λ 型 3 準位系の生成を確認できた。

Λ 型 3 準位系の制御法による 5 準位系の分布制御の結果は当日報告する予定である。