

## 観測操作と強レーザー場を利用した多準位系の分布動力学制御

(慶大院・理工) ○菅原道彦

【序】断熱通過・ $\pi$ パルスなどを利用した準位分布制御スキーム、最適制御理論を用いたコヒーレント制御等では制御入力としてレーザーを念頭においている。しかし、近年、観測操作がシュレディンガー方程式によって記述されるユニタリーな時間発展とは異なる動力学を量子系にもたらすことが明らかにされている。量子ゼノン効果に代表されるこれらの量子系動力学に対する観測効果は波束の収縮がもたらすデコヒーレンス（位相破壊）が原因となっている。本研究では、レーザー場によって導入される「(相対)位相関係の構築」というコヒーレント制御的な操作と、「位相関係の破壊」をもたらす観測操作を組み合わせた多準位系の分布制御描像を提示する。この際、レーザーによる駆動力と観測操作による位相破壊過程が共存する状況において作り出される定常状態に注目し、照射レーザー強度を調整することによってこの最終定常状態分布を制御している。

【理論】本研究では量子観測をノイマン型の射影操作によってする立場を採用する。さらに、系を観測対象となる部分系Pとその補空間であるQに分割する。任意の物理量演算子 $\hat{A}$ に対応する観測操作による系の状態遷移は、物理量 $\hat{A}$ の固有状態で表現された系の密度行列 $\rho$ を用いて以下のように表される。

$$\hat{O}\rho = \hat{O} \begin{pmatrix} \rho_{p_1 p_1} & \cdots & \rho_{p_1 p_n} & \rho_{p_1 q_1} & \cdots & \rho_{p_1 q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{p_n p_1} & \cdots & \rho_{p_n p_n} & \rho_{p_n q_1} & \cdots & \rho_{p_n q_n} \\ \rho_{q_1 p_1} & \cdots & \rho_{q_1 p_n} & \rho_{q_1 q_1} & \cdots & \rho_{q_1 q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{q_n p_1} & \cdots & \rho_{q_n p_n} & \rho_{q_n q_1} & \cdots & \rho_{q_n q_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_{p_1 p_1} & 0 & 0 & \mathbf{0} \\ 0 & \ddots & 0 & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & \rho_{p_n p_n} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \rho_{q_1 q_1} & \cdots & \rho_{q_1 q_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{q_n q_1} & \cdots & \rho_{q_n q_n} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、添え字  $p_i$  は P 空間、 $q_i$  は Q 空間の状態を表している。この操作は、P 空間内のコヒーレンス及び P と Q 空間の間のコヒーレンスが消去されている一方で、Q 空間内のコヒーレンスが保持されていることを示している。観測操作が微小時間間隔  $\tau$  で頻繁に繰り返し系に施されるとし、観測間の時間発展演算子中の  $\tau$  に関して 2 次までの摂動展開を施すと、観測下における量子系の時間発展を記述する実効リウヴィリアン  $L_{\text{eff}}(\tau) \equiv L_0 + L' + i\Gamma(\tau)$  を得ることが出来る[1]。ここで、 $L_0 = [H_0, \ ]$ 、 $L' = [H', \ ]$ 、但し  $H_0, H'$  はそれぞれ系の 0 次ハミルトニアン ( $\hat{A}$  と交換可能な成分) 及び残りの相互作用ハミルトニアン (光子場と分子系の相互作用) である。また、観測操作によるインコヒーレントな準位間遷移を表す演算子  $\Gamma(\tau)$  は、 $L'$  が時間に依存しない場合、 $\Gamma(\tau) = \hat{O}L'L'\hat{O}\tau$  で表される。 $L_{\text{eff}}(\tau)$  を行列表現して固有値解析を施すことにより、 $t \rightarrow \infty$  における定常状態の準位分布を求めることが出来る。すなわち、 $L_{\text{eff}}(\tau)$  の固有値 0 に対応する固有ベクトルを、 $\bar{\mathbf{c}}_{\bar{n}}$  ( $\bar{n} = 1, 2, \dots$ ) とすると、初期状態  $\mathbf{c}_0$  から十分時間が経った時に実現される定常固有状態分布は

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{c}(t) = \sum_{\bar{n}} (\bar{\mathbf{c}}_{\bar{n}} \cdot \mathbf{c}_0) \bar{\mathbf{c}}_{\bar{n}} \quad (2)$$

で与えられる。なお、このとき他の固有ベクトルは有限の寿命を持っているとする。

【応用】図 1 に示す様な Kobrak-Rice 型 5 準位系を考える[2]。準位  $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$  間に強度  $\Omega_{12}$ 、 $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ 、 $|2\rangle \leftrightarrow |4\rangle$  間に  $\Omega_{23}$ 、 $\Omega_{24}$ 、 $|3\rangle \leftrightarrow |5\rangle$ 、 $|4\rangle \leftrightarrow |5\rangle$  間に  $\Omega_{35}$ 、 $\Omega_{45}$  の定常レーザーを照射する。なお、全てのレーザーの振動数は各遷移振動数に対して共鳴条件を満たしている。初期状態を  $|1\rangle$  に取り、頻繁な観測操作を状態  $|2\rangle$  に施す場合を考える。今、レーザー強度を等しく  $\Omega_{12} = \Omega_{23} = \Omega_{24} = \Omega_{34} = \Omega_{35} = 1$  とし、観測間隔  $\tau$  を  $\pi/15$  とした場合の準位分布の時間発展を図 2 に示す。状態分布はラビ振動の様なコヒーレントな振動運動をほとんど見せることなく定常状態分布である  $|1\rangle=1/4$ 、 $|2\rangle=1/4$ 、 $|3\rangle=1/8$ 、 $|4\rangle=1/8$ 、 $|5\rangle=1/4$  に収束している。

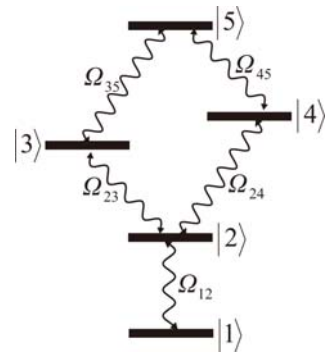


図 1 Kobrac-Rice 型 5 準位系

図 3 はレーザー強度を  $\Omega_{12} = 1$ 、 $\Omega_{23} = 2c$ 、 $\Omega_{24} = 2(1-c)$ 、 $\Omega_{34} = 2d$ 、 $\Omega_{35} = 2(1-d)$  と置いた時の定常状態分布の  $c$  及び  $d$  依存性を示している。なお、実効リウビアンが成立する条件を満たしていれば、観測操作の間隔  $\tau$  に定常分布は依存せず、準位  $|2\rangle$  と準位  $|5\rangle$  の依存性は全く同一なものが見られることがわかった。図 3 の結果は本制御法を用いて一つの状態に 100% の確率で選択的に分布させることが出来ないことを示している。しかしながら、準位  $|3\rangle$  と  $|4\rangle$  の選択励起は  $c=d$  の直線上の依存性を利用することによって実現される。すなわち、 $c=d=1$  の場合に  $|3\rangle=1/4\sqrt{2}$ 、 $|4\rangle=0$  の様な選択的励起状態が定常分布として得られる。一方で、反対の選択性は  $c=d=0$  の場合の定常分布  $|3\rangle=0$ 、 $|4\rangle=1/4\sqrt{2}$  として得られる (図中白丸参照)。また準位  $|2\rangle$ 、 $|5\rangle$  への分布を抑えながら準位  $|3\rangle$  (または準位  $|4\rangle$ ) への選択励起を起こさせたい場合は図中の白抜き三角で示されている条件、 $c=0.5$ 、 $d=0$  ( $c=0.5$   $d=1$ ) を選択すればよいことがわかった。

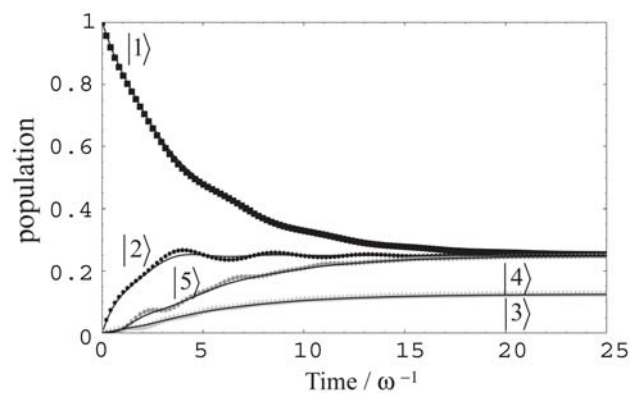


図 2 準位分布の時間変化 (準位 2 を観測)

【参考文献】

[1] M. Sugawara, J. Chem. Phys. 123 (2005) 204115.  
 [2] J. Gong, S. A. Rice, J. Chem. Phys. 120 (2004) 9984.

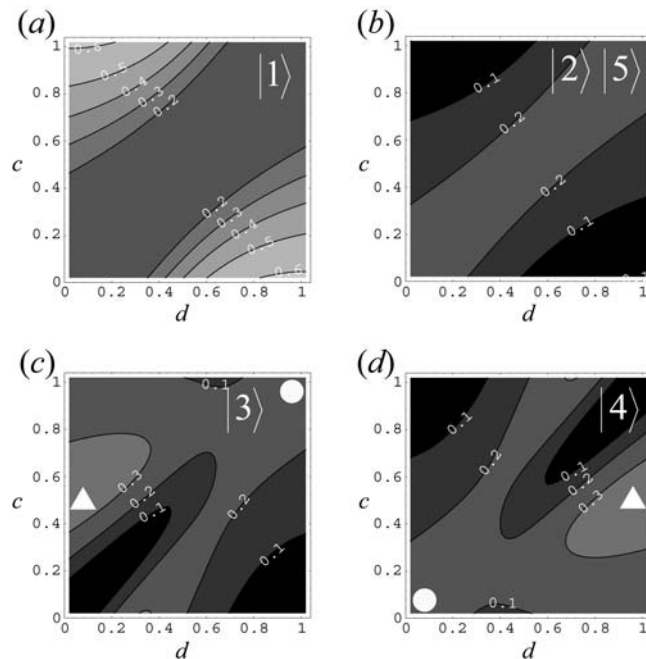


図 3 定常状態分布のレーザー強度依存性