

3P113 観測・デコヒーレンスを利用した量子制御

(慶大・理工) 菅原道彦

【1】序

レーザー技術の進歩、特にパルス成形・位相制御の技術発展に伴いこれまで提示されてきた量子制御理論の多くはコヒーレント制御の概念に基づいたものである。その一方で、量子系に対する観測操作がもたらす波動関数の位相関係の破壊、すなわちデコヒーレンス効果を利用した新たな量子制御の概念が提示されている。通常、コヒーレント制御の障害とみなされてきたデコヒーレンスを積極的に利用して、ユニタリ時間発展では到達できない量子状態に系を遷移させるという試みは新鮮である。また、位相の精密制御が必要であるコヒーレント制御のアプローチと比較して、デコヒーレンスを利用した量子制御は実験的にも実現容易であると考えられる。本研究では、観測操作を系の運動方程式に取り込んだ形で量子系の動力学を取り扱うことにより、デコヒーレンス効果がもたらす新たな量子制御の可能性を探る。この際、制御機構の物理的描像を量子ゼノン・逆量子ゼノン効果、無相互作用観測などの概念と絡めて議論する。

【2】観測操作（デコヒーレンス）の下での量子系の運動

量子系における観測操作に対応する演算子を導入する。本論では、観測問題の詳細には立ち入らず、通常認知されているノイマン型の射影操作によって量子系の観測が表現されるとする立場を採用する。すなわち、任意の物理量演算子 \hat{A} に対応する観測を行った場合、現在の系の状態 $|\Psi\rangle = \sum a_i |\phi_i\rangle$ (但し、 a_i 、 $|\phi_i\rangle$ は \hat{A} の固有値及び固有状態) は、観測後に確率 $P_i = |a_i|^2$ に従って $|\phi_i\rangle$ に遷移する (波束の収縮)。単一の量子系に対して観測がなされた場合は上記のノイマン型射影で観測操作を表すのが適当であるが、通常の実験では多数の独立な系の集合、すなわちアンサンブルを考え系の状態を密度行列で記述する方が適当であろう。この場合、観測後の状態は対角項に P_i を持つ対角行列として表現される混合状態密度行列に対応すると考えられる。従って、観測操作を密度行列に対して以下の様な変化を与える演算子 \hat{O}_A として定義することができる。

$$\hat{O}_A \begin{pmatrix} |a_1|^2 & a_1 a_2^* & \cdots & a_1 a_n^* \\ a_2 a_1^* & |a_2|^2 & \cdots & a_2 a_n^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n a_1^* & a_n a_2^* & \cdots & |a_n|^2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} |a_1|^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & |a_2|^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & |a_n|^2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

これは、観測操作が密度行列の非対角成分の消去、言い換えるとコヒーレンスの破壊に対応していることを示している。断続的に観測が行われる場合は、密度行列の運動方程式 $\dot{\rho}(t) = -i\hat{L}\rho(t)$ に従って時間発展する密度行列 $\rho(t)$ に対し、観測が行われる度に演算子 \hat{O}_A を施せばよい。(但し、 $\hat{L} \equiv [\hat{H}, \]/\hbar$ 、 \hat{H} は系のハミルトニアン) この場合、観測操作を制御入力として考えた場合の調整可能なパラメータは観測頻度とみなすことができる。一

方で、連続的な観測が施されている場合は、観測操作によるコヒーレンスの破壊頻度を位相破壊緩和定数として系の運動方程式に取り込むことができる。

【3】観測操作による量子系の制御

図1に示すような3準位系を考える。今、準位 $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 間に角振動数 ω_{12} 、 $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ に ω_{23} の定常レーザーを照射し、準位 $|1\rangle$ と準位 $|3\rangle$ について状態分布を観測する。観測操作は連続的に行われるとした。 ω_{12} と ω_{23} には共鳴条件を与え、 $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 、 $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ 間のラビ振動が等しくなる様な強度の定常レーザー光を照射し、かつ観測が施されない場合についての準位分布の時間発展を図2に示す。 $|1\rangle$ と $|3\rangle$ の間を分布は振動するが $|2\rangle$ に50%以上分布することはない。次に、 $|3\rangle$ に対する極端に頻繁な観測を施すことにより、 $|1\rangle$ と $|3\rangle$ 、 $|2\rangle$ と $|3\rangle$ 間のコヒーレンスを著しく破壊する。そのような条件下での準位分布のダイナミクスを図3に示す。 $|3\rangle$ への遷移が著しく妨げられ主に $|1\rangle$ と $|2\rangle$ の間で分布が振動している。この振動は2準位系のラビ振動に対応しており、 $|3\rangle$ に対する頻繁な観測により、系は見かけ上準位 $|3\rangle$ が除かれた2準位系として振舞っていることがわかる。この効果は、観測し続けることによって系の量子状態が「準位 $|3\rangle$ に分布していない」という状態に固定されているとみなすことができる(量子ゼノン効果)。また、この現象は見方を変えると量子論的観測問題で議論されている無相互作用観測の機構と本質的に同一である。さらに、準位 $|3\rangle$ に対する観測を図3のダイナミクスの途中で停止し、準位 $|1\rangle$ への観測に切り替えることによりラビ振動を $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ から $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ に移動させ、 $|1\rangle \rightarrow |2\rangle \rightarrow |3\rangle$ の様に分布を逐次的に移動させることも可能である(図4参照)。また、STIRAP等に代表される断熱通過を利用した分布制御の機構も、デコヒーレンスと観測を同義とみなすことによって(逆)量子ゼノン効果として解釈することができる。

