

ファイバー光伝播による Chaotic Quantum System の模擬実験

慶大理工 山田興一

古典的電磁波を記述する波動方程式とSchrodinger方程式との対応から種々の量子カオス模擬実験が提唱され[1],[2]、マイクロ波領域で、energy 固有値分布の実験[3]や散乱実験[4]が行われている。我々は、系のdynamicsを調べるにはファイバー内の光伝播実験が比較的实现容易と考え、Multi-mode Fiberの基本的特性を調べ、摂動の印加方法、位相共役波発生による時間反転実験の可能性を検討している[5]。

よく知られているように古典的な単色光の満たす波動方程式はHelmholtz方程式となり、さらにほぼ1方向に伝播する光はその伝播方向についての変化が小さいときSchrodinger方程式となる。半径 a のファイバー内（屈折率分布を円筒座標で $n_1(r, \phi, z)$ とする）を伝播する単色光（波長 λ ）が周期的（長さ L ごと）に摂動を受けている場合、そのSchrodinger方程式を無次元化して円筒座標 (ρ, ϕ, t) で表すと

$$i\hbar \partial \Psi / \partial t = (-\hbar^2 \Delta_r / 2 + V(\rho, \phi, t)) \Psi$$

となる。ここに $\rho = r/a$, $t = z/L$ で、無次元化した”Planck定数” $\hbar = \lambda L / a^2$ は光学でいうFresnel数の逆数に対応する。”時間” t が現実には位置 z に置き変わっている点に注意。 Δ_r は ρ と ϕ についてのLaplacianで、ポテンシャルに相当する V は、

$$V(\rho, \phi, t) = (1 - (n/n_0)^2) / 2,$$

$$n = n(\rho, \phi, t) = n_1(\rho a, \phi, tL),$$

と表される。ここで n_0 は fiber cladの屈折率である。この V を非摂動項 V_0 と摂動項 V_1 に分けると V_0 は2次元原子のポテンシャルとみなせる。例えば、Step fiber (n_1 が定数) は2次元箱型ポテンシャルの原子に対応する。このようにこの系は、2次元原子が周期的摂動を受けている量子系の模型となっているのであり、ファイバーの屈折率を変えれば異なる原子を扱え、摂動の印加方法もある程度制御可能となる。系のdynamicsは伝播方向 (z) に (r, ϕ) のmode分布を追って行くことになる。”Planck定数” $\hbar$ は、現実のファイバ

ーで1を中心に2桁程度変えられ量子古典対応実験に適している。Mode数は、コア直径 $80\mu\text{m}$ で7000程度であり($\lambda = 633\text{nm}$)解析するには少々多すぎるが、直径の小さなファイバーや波長の長い光を用いれば減少できる。

典型的なカオス系は、R.E.Plangeらの提案した δ 関数的摂動を印加すれば解析が容易である[2]。1周期の時間発展演算子の固有関数(Floquet state)が比較的容易に得られるからである。Step fiberの場合はビリアード問題となり、その古典的対応は著しいカオスを示す。しかし、強いマイクロ波内のRydberg原子の例のようにサイン波的摂動でもカオスは期待でき実験的にはこのほうが実現容易と思われる。

つぎに位相共役波発生による時間反転実験の可能性について述べる。ハミルトニアンに時間対称性があるとき、波動関数の位相共役 Ψ^* をつくれば時間反転実験が可能となる。この実験はカオス系でのmixingを調べるのに最適で計算機実験では広く用いられている[6]。現実の量子系では単純な2準位系を除いて状態の位相共役をつくるのは困難であるが、光学系では位相共役波発生[7]として実現できるので上記のファイバーの系との組合せで時間反転実験が可能となる。

実験はまだ初歩的段階で、ファイバーの基本特性の検討、固有modeの解析法、現有のレーザー装置による位相共役波発生実験をおこなった。その要点を以下に記す。用いたファイバーは市販の石英系スッテプ型多モードファイバー($a = 80, 100\mu\text{m}$)である。

①トンネル効果を利用したPrism Couplerにより比較的高次の単一Modeの励起が可能で、応力による摂動でMode分布がひろがることがわかった。

②顕微鏡による near field pattern、撮像管による far field patternの観測はできるが、詳細なモード解析には高度の画像処理が必要となる。

③位相共役波発生の光源として窒素レーザー励起色素レーザー(パルス光で30kW, 7ns)を用い、非線形光学材料として有機色素と半導体ドープガラスについて位相共役波発生効率を調べた結果、後者が適しているようである。しかし変換効率は1%程度で、さらに強力なレーザーと非線形感受率の高い物質を必要とする。

今後の計画として、まず、カオスの onset、量子系特有の localization の観測、

mixing の $\hbar$ 依存性が目標である。また V_0 の 2 次元性や偏光特性を考慮すればさらに発展的なモデルとなるとおもわれる。

参考文献

- [1] J. Krung, Phys. Rev. Lett., 59, 2133 (1987)
- [2] R. E. Prange and S. Fishman, Phys. Rev. Lett., 63, 704 (1989)
- [3] H. J. Stockmann and J. Stein, Phys. Rev. Lett., 64, 2215 (1990)
- [4] E. Doron, U. Smilansky and A. Frenkel, Phys. Rev. Lett., 65, 3072 (1990)
- [5] K. Yamada, J. Phys. Soc. Japan, Vol. 60, No. 2, (1991)
- [6] D. L. Shepelyansky, Physica, 8D, 208 (1983)
- [7] A. Yariv, IEEE J. Quantum Electron., QE14, 650 (1978) ; QE15, 523 (1979)