

分子の振動固有状態を用いた量子ゲート操作

(分子研¹, JST-CREST², 総研大³, 東北大・院理⁴)○穂坂 綱一^{1,2}, 島田 紘行^{1,2}, 千葉 寿^{1,2}, 香月 浩之^{1,2,3}, 寺西 慶哲^{2,4},
大槻 幸義^{2,4}, 大森 賢治^{1,2,3}

[序]

物質に光を照射すると、光電場の位相振幅情報が物質の波動関数に転写される。我々はこれまでに、アト秒精度で相対位相を制御したフェムト秒パルス対を分子に照射することにより、分子内の複数の振動固有状態の振幅と位相を制御して生成し、読み出すことに成功している[1,2]。このような高精度の位相振幅制御の応用の一つとして、分子の内部固有状態を用いた量子情報処理が考えられる。我々は既にヨウ素分子の振動固有状態波動関数の時間発展を用いた量子フーリエ変換 及び制御NOTゲート操作を提案している[3]。本討論会では、実際の量子ゲート操作実験に必要な基盤技術の開発及び、それらを用いた量子フーリエ変換実験に関して報告する。

[波動関数の時間発展を用いた量子ゲート操作]

分子に短パルスレーザー光を照射すると、複数の内部固有状態の重ね合わせ状態が励起される。それぞれの固有状態の波動関数において、その振幅は時間に関して一定であるが、位相項は固有エネルギー E_n に対応した遷移周波数 $\omega_n = E_n / \hbar$ で時間発展し、固有状態間の位相関係は時々刻々変化する。各固有状態の線形結合で新しい論理基底を表現することにより、位相関係の時間発展をゲート操作に対応づけることができる(図 1)。つまり、任意の始状態に対応した位相振幅情報を分子に転写し、一定時間経過後に固有状態間の相対位相を測定することで、入力した状態にゲート操作を施した終状態を得ることができる。

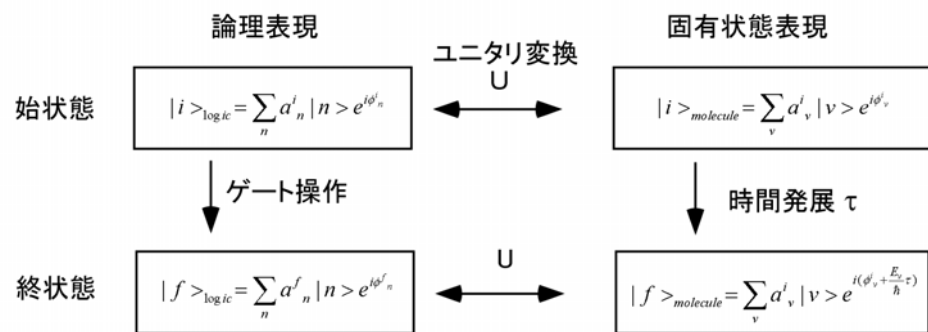


図 1 論理表現及び固有状態表現で表した波動関数の時間発展。

[量子情報の入力と出力]

任意の始状態に対応した位相振幅情報を分子に書き込むために、励起光パルスを波形整形する。整形素子として空間光変調器(SLM)を用いることで、それぞれの固有状態に対応した周波数成分の振幅及び位相を直接制御することができる。

量子情報の読み出しには特定の時刻における各固有状態の振幅、及び位相の測定を必要とするが、これは量子干渉法によって行う[4]。即ち、振幅、及び位相が未知の終状態に対して、振幅、及び位相が既知の参照光で生成した波動関数を重ねあわせ、両者の干渉効果による各準位のポピュレーション分布を測定する。参照光の位相変化に対する各固有状態のポピュレーション分布の変化から、終状態における位相振幅情報を決定する。整形光パルスと参照光は一つのレーザーの出力から分割して作成し、それらの光路差をアト秒レベルで制御する。

[固有状態ポピュレーション分布の高速読み出し]

固有状態のポピュレーション分布を得るために、我々はこれまでナノ秒レーザーパルスの波長を掃引しレーザー誘起蛍光法(LIF)による励起スペクトルを測定してきた[1,2]。今回我々は高速、かつ高感度な位相振幅情報読み出しのために、光電子分光法に基づいた位相振幅デコーディング装置を開発した。ナノ秒レーザーパルスによって分子をイオン化することで、各固有状態からはそれぞれエネルギー保存則を満たすような運動エネルギーを持った光電子が放出される。光電子の運動エネルギースペクトルを測定することにより、励起波長の掃引なしで固有状態のポピュレーション分布を得ることができる。また光電離で生成する全ての光電子を静電場で加速し2次元検出器に衝突させ、その検出位置分布測定することで、電子エネルギー分析器のパラメータ掃引なしで全立体角検出を行うことができる。

[ヨウ素分子固有状態における量子フーリエ変換]

実験にはヨウ素分子B状態上の8つの振動固有状態を3ビットの量子メモリとして用いる。これらの固有状態において振動状態間のエネルギー間隔はおおよそ 90cm^{-1} であり、これらの固有状態の位相関係は400fsの周期で時間発展する。例えば、1/4周期後、即ち励起状態生成後100fsの時点において、隣接する固有状態間の位相関係は初期状態から 90° ずつずれる。このように相対位相の変化した固有状態の重ね合わせ状態を新しい論理基底で表現することにより、量子フーリエ変換が実現される。

[1] K. Ohmori, Y. Sato, E. E. Nikitin, S. A. Rice, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 243003 (2003).

[2] K. Ohmori, H. Katsuki, H. Chiba *et. al.*, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 093002 (2006).

[3] Y. Teranishi, Y. Ohtsuki, K. Hosaka, H. Chiba, H. Katsuki, and K. Ohmori, *J. Chem. Phys.* **124**, 114110 (2006).

[4] 本討論会 1P083 “空間光変調素子を用いたアト秒位相変調器の開発” 千葉 寿 他