

光電子検出による高速量子位相振幅モニターの開発

(分子研¹, 総研大², 科学技術振興機構・CREST³)穂坂綱一^{1,3}、千葉寿^{1,3}、香月浩之^{1,2,3}、○大森賢治^{1,2,3}

[分子を用いた量子情報操作]

近年、物質の波動関数の振幅や位相を制御しようとする様々な試みがなされるようになった。このコヒーレント制御と呼ばれる量子制御の有望な戦略の1つとして、物質の波動関数に波としての光の位相を転写する方法がある。2準位系に、そのエネルギー差 E を持った光を照射すると、励起状態の波動関数は $e^{-i(\frac{E}{\hbar}t+\delta)}$ の時間振動項を持つ。このうちの位相項 $e^{-i\delta}$ を利用すると、励起状態の波動関数を干渉させ、励起状態のポピュレーションを制御することができる。紫外可視光励起で波動関数は数フェムト秒からアト秒の周期で振動しており、干渉制御するためにはアト秒レベルの精度を要する。著者らは2つの光パルス間の位相差をアト秒レベルの精度で制御する技術を開発し、このような戦略で任意の振電状態への遷移確率をほぼ100%消滅できることを示した[1]。

また、光パルスのバンド幅内に複数の状態への共鳴線がある場合には、そのそれぞれの状態に対して、独立にポピュレーションを制御できる。HgAr分子のA状態の振動量子数 $v=3-5$ の状態を対象に、任意の振電状態のポピュレーションを制御している例を図1に示す。図1の(a)、及び(b)ではすべての状態が同時に増減しているが、図1の(c)、及び(d)にあるように任意の状態のポピュレーションだけを増幅、消滅させることができる。ここでは振動量子数だけを対象にしているが、電子、振動、回転状態という多階層の内部状態を持つ分子は、多 qubit の量子情報を記録できる量子演算素子として有望である。

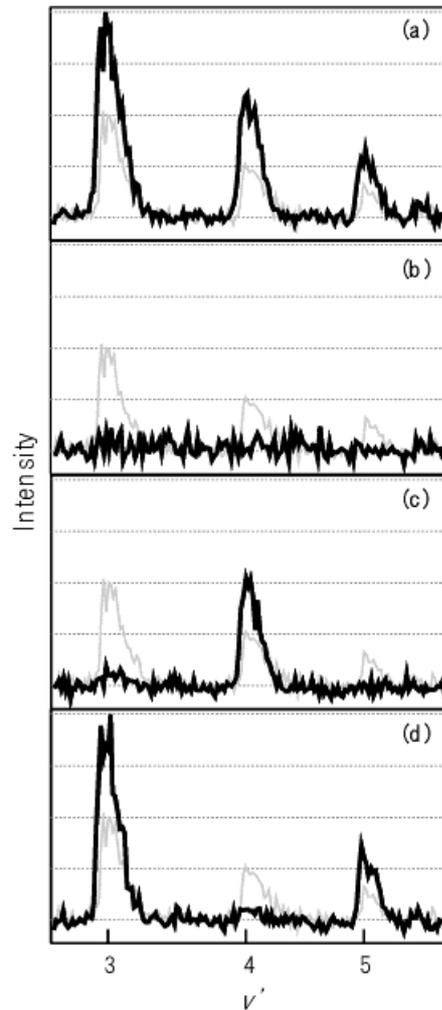


図 1. 位相制御光パルス列による振電状態のポピュレーションの制御。3つの状態は左からHgAr分子A状態 $v=3-5$ の各状態[1]

[量子情報の読み出し]

分子の内部状態に準備された量子状態に、様々なゲート操作を施すことで演算結果が生成する。これまで我々は、その演算結果を束縛状態間の共鳴遷移強度の測定、つまり、対象とする状態と、さらに上の励起状態との間のレーザー誘起蛍光(LIF)スペクトルを観測することによって読み出してきた。LIF法を用いた内部状態分布の読み出しは、高い状態分解能という長所を持つ一方で、励起エネルギーを掃引するために少なくとも数分の時間を要する。レーザーの1サイクルで生成する量子状態を読み出すために、数分の間、同じ状態を作り続けることは本質的に無駄が大きく、状態の反復制御や実用的な演算の実施は難しい。そこで、レーザーの1ショットによる分子の内部状態分布の読み出しを目標に、光電子分光法を用いた量子情報読み出しシステムを開発している。

[光電子分光法による量子情報の読み出し]

量子情報読み出しシステムの概要を図2に示す。量子演算を行なう光パルスと同軸にプローブ光を入射し、分子をイオン化させる。放出された光電子は均一電場によって加速された後、運動量収束され、MCPと蛍光板からなる位置敏感検出器に衝突する。各光電子の検出位置は、その運動エネルギーの検出器面内への射影成分に相当する。光電子の検出位置分布を CCD カメラで撮像し、空間対称性を仮定した解析を行なうことで、光電子のエネルギースペクトルとそれぞれのエネルギーでの角度分布が得られる。光電子のエネルギー分布には、分子のエネルギー固有状態のポピュレーション分布が反映され、角度分布には各内部状態の電子状態の性質が反映される。全立体角に放出される光電子を全て検出するために検出効率が大きく、波長掃引を必要としないために原理的にはレーザーの1ショット、実際には CCD カメラの1フレームで、分子に埋め込まれた量子情報を読み出すことができる。

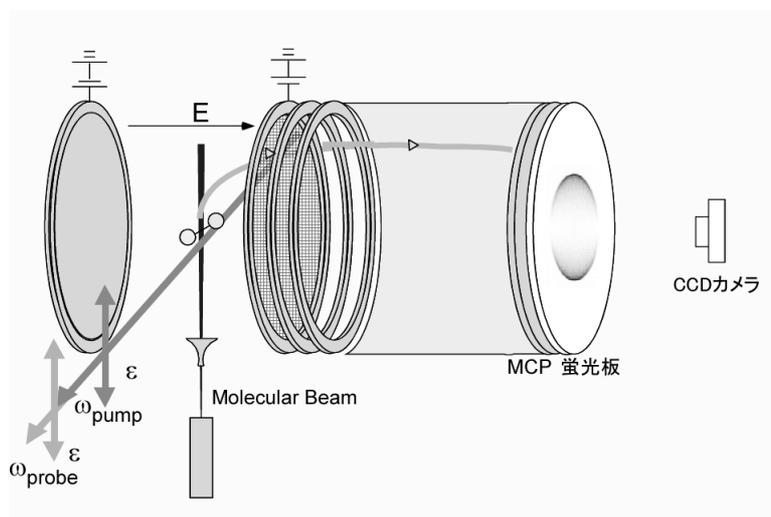


図 2. 光電子分光システムの概略図

[展望]

分子への情報の書き込みや演算は、相対位相を制御した光パルス列や、波形整形した光パルスを用いて行なわれる。光電子分光法を用いた高速量子情報読み出しシステムの完成によって、書き込まれた量子状態の逐次モニターによるフィードバックをかけた演算が可能となる。

[参考文献]

[1] K. Ohmori et al. Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 243003.