

磁性原子を内包した人工原子の光励起スペクトル

(日大理工) ○佐甲徳栄

【序】 近年半導体微細加工技術の進展により、少数の電子をナノスケールのポテンシャル井戸に閉じ込めた「人工原子」と呼ばれる有限量子系を作成することが可能となっている [1]. 人工原子は、一般化された Kohn の定理の帰結として人工原子内部の電子とレーザー電場とが非常に強い双極子相互作用を持つため [2], 半導体レーザーの光源として、あるいは次世代光デバイス素子として近年大きな注目を集めている.

最近, Mn 等の高い磁気モーメントを持つ原子を取り入れた, 磁気不純物原子内包型の人工原子の作成が Léger らによって報告されている [3]. 磁気不純物原子の電子スピンは, 人工原子内の電子と強い交換相互作用を持つため, 人工原子内電子をレーザー電場を用いて制御することによって, 磁性原子の電子スピン, すなわち磁気モーメントを, 間接的に効率よく制御することができると期待される. 本研究では, レーザー電場を用いた磁気不純物原子の磁気モーメント高速制御スキームの確立を目的として, 磁気不純物原子を内包した人工原子の電子構造および光励起スペクトルを調べた.

【理論モデル】 スピン \vec{M}_α を持つ磁気不純物原子 $\alpha (\alpha = 1, \dots, L)$ を内包する N 電子人工原子のハミルトニアンは次の形をとる:

$$\hat{H} = \sum_{i=1}^N \frac{\hat{\mathbf{p}}_i^2}{2} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} (\omega_x^2 x_i^2 + \omega_y^2 y_i^2 + \omega_z^2 z_i^2) + \sum_{i>j}^N \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} - \sum_{i=1}^N \sum_{\alpha=1}^L J_\alpha \vec{M}_\alpha \cdot \vec{s}_i \delta(\mathbf{r}_i - \mathbf{R}_\alpha). \quad (1)$$

右辺第2項は人工原子の調和型の閉じ込めポテンシャルを表し, 末項は不純物原子スピンと電子スピンとの交換相互作用項を表す. ハミルトニアン(1)の固有エネルギーおよび固有関数は, まず末項の交換相互作用項がないスピン非依存のハミルトニアンについて配置間相互作用法を用いて固有値・固有ベクトルを求め, 次に, 得られた固有ベクトルを用いて交換相互作用項の寄与を摂動的に取り入れることによって計算した. また基底関数としては, 非等方な調和ポテンシャル中に閉じ込められた電子の電子密度を適切に表現するために, 非等方ガウス関数系 [4] を用いた.

【電子構造および光励起スペクトル】 ハミルトニアン(1)における最も簡単な場合として, 電子数2 ($N=2$), スピン量子数 $1/2$

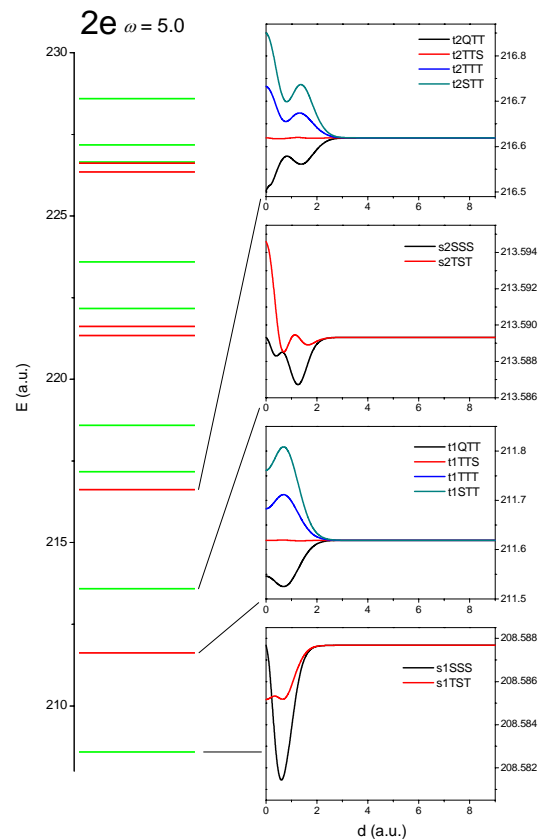


図 1. 擬 1 次元人工原子 ($N=2, \omega=5.0$) のエネルギー準位構造. 磁気不純物原子なし (左) およびあり (右). 左図の緑線・赤線はそれぞれ 1 重項・3 重項を表す. 右図の横軸は不純物原子間距離を表す.

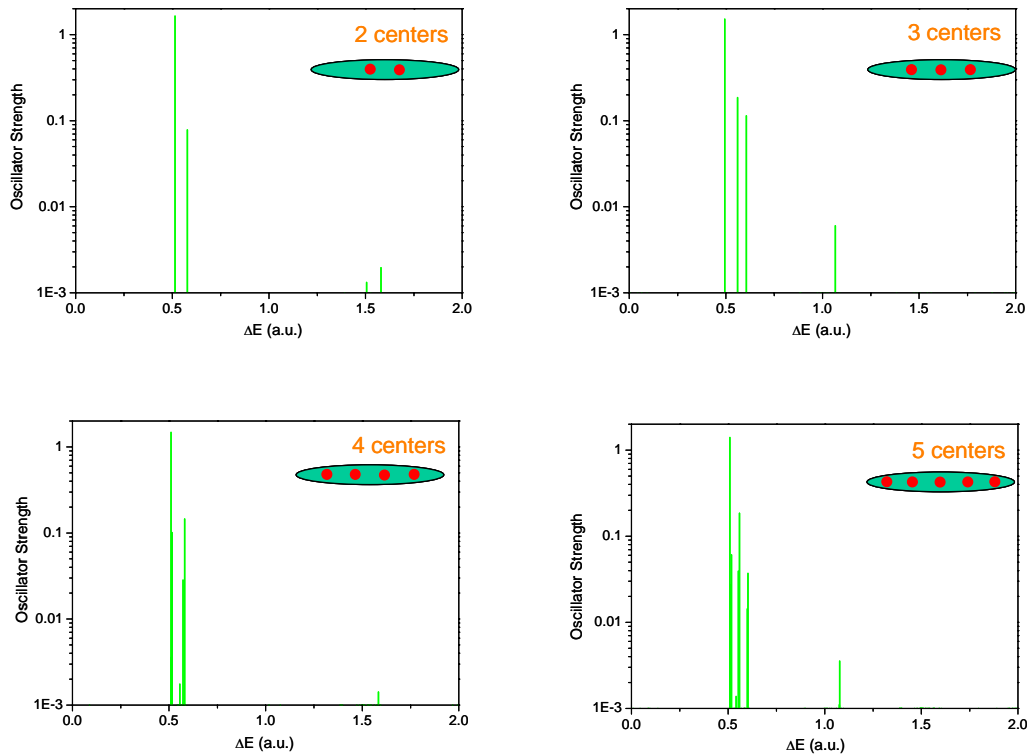


図 2. 擬 1 次元人工原子($N=2$, $\omega=5.0$)の振動子強度分布. 各図右上に磁性原子の数および空間配置の模式図を示す.

を持つ磁気不純物原子を2個内包した擬1次元人工原子に着目し、不純物原子間距離を変化させてエネルギー準位を計算した. 例として図1に、閉じ込めの強さが $\omega = 5.0$ の場合におけるスピン電子エネルギー準位構造を示す. 磁気不純物原子を含まない人工原子においては、エネルギー準位構造は、電子波動関数の節の数によって定義されるポリヤッド量子数 ν_p で表されるバンド構造を持つことが知られている(図1左) [5,6]. 磁気不純物原子が導入されると、個々のエネルギー準位は、1重項は2個、3重項は4個のスピン電子状態に分裂する(図1右). $\nu_p = 0 \sim 4$ までの各準位についてエネルギーの変化を調べたところ、不純物原子間距離の関数として、超微細構造のエネルギーが振動構造を持つことが見出された. そしてこの振動構造は、電子波動関数の節構造を反映していることが示された.

また、この擬1次元人工原子について、磁性原子の数および空間配置を変化させて、基底状態からの振動子強度分布の計算を行った(図2). 磁性原子を含まない人工原子においては、一般化されたKohnの定理によって、振動子強度は重心励起のみに集中することが知られている. 一方、図2に示される通り、磁性不純物原子を含む場合には、振動子強度が重心励起状態近傍のスピン電子準位に分配されることが示された. この結果は、適切な励起波長を選択することによって、磁気不純物原子のスピン状態を制御できる可能性を示唆している.

- [1] N. F. Johnson, *J. Phys.: Condens. Matter* **7** 965 - 989 (1995).
- [2] W. Kohn, *Phys. Rev.* **123** 1242 - 1244 (1961).
- [3] Y. Léger et al., *Phys. Rev. Lett.* **97** 107401 (4 pages) (2006).
- [4] T. Sako and G.H.F. Diercksen, *J. Phys.: Condens. Matter* **15** 5487-5509 (2003).
- [5] T. Sako and G.H.F. Diercksen, *Phys. Rev. B* **75** 115413(12 pages) (2007).
- [6] T. Sako and G.H.F. Diercksen, *J. Phys.: Condens. Matter* **20** 155202 (13 pages) (2008).