

参 考 文 献

- 1) N.F.Mott, Proc. Phys. Soc. (London) 62 416 (1949)
- 2) H.Fukutome, Prog. Theor. Phys. 40, 998 (1968)

高密度励起子の問題

東大 花 村 栄 一

Laser 技術の開発に伴つて、高密度の励起子状態が結晶中に、準安定状態として実現される様になつた。又、有効質量が軽く、誘電率の大きい半導体では、有効ボーア半径が大きく、容易に電子間間隔とボーア半径の比は 1 以下となり、金属以上の高密度が実現される。又 laser 光の強度を適当に変動する事によつて、任意の電子状態が得られる。

光と励起子の相互作用の強い直接バンドギャップを持つ半導体では、高密度励起子のルミネッセンスのスペクトルに多彩な多体効果が反映される。又、間接バンドギャップの半導体では、励起子は準熱平衡状態にあるとして理論的取り扱いができる。特にこの場合を理論的に示したい。

(1) 励起子を Bose particle として取扱いと、その粒子間の相互作用、及び、Pauli 排他律を破る効果は、非調和項として表わされる。今、価電子帯と伝導帯の 2-band model に対して、有効質量近似の範囲内では、価電子帯の p 状態から伝導帯の P 状態に励起する Bose Operator C_p^{*P} を導入すると、次の Bose Hamiltonian が得られる。

$$H_2 = \sum_{p,P} [\epsilon_c(P) - \epsilon_v(p) + \sum_{p'} (V_{p-p'} - V_{P-p'}^{cvvc})] C_p^{*P} C_p^P \\ - \sum_{p,P,p_\ell} (V_{p_\ell-p} - V_{p-P}^{cvvc}) C_{p_\ell}^{*p-p+P} C_p^P$$

$$H_4^{(1)} = \frac{1}{2} \sum_{p, P, p', P', p_\ell, P_\ell} \{ V_{P-P_\ell} C_{p'}^{*P'-P_\ell+P} C_p^{*P_\ell} C_{p'}^{P'} C_p^P \\ - 2V_{P_\ell-P'} C_p^{*P-p'+p_\ell} C_{p_\ell}^{*P'} C_{p'}^{P'} C_p^P \\ + V_{p_\ell-p'} C_{p+p'-p_\ell}^{*P} C_{p_\ell}^{*P'} C_{p'}^{P'} C_p^P \}$$

$$H_4^{(2)} = \sum V_{p_\ell-p'} C_{p_\ell}^{*P+p_\ell-p'} C_p^{*P'} C_{p'}^{P'} C_p^P$$

$$H_4^{(3)} = -\frac{1}{2} \sum \{ V_{P-P_\ell} C_p^{*P+P'-P_\ell} C_{p'}^{*P_\ell} C_{p'}^{P'} C_p^P \\ + V_{P_\ell-p'} C_{p'+p-p_\ell}^{*P'} C_{p_\ell}^{*P} C_{p'}^{P'} C_p^P \}$$

上の近似では、他の非調和項は表われないが、有効質量近似をとらないと、更に、二つ又は三つの励起子を消滅させて、一つの励起子を作つたり、その逆の Process も可能になる。又より高次の非調和項も表われる。

H_2 は調和部分で、低密度の場合は、これが基本の Hamiltonian となる。 H_2 の最後の項が電子・正孔間の引力である。 $H_4^{(1)}$ は、励起子間のクーロン相互作用、 $H_4^{(3)}$ が、電子間又は、正孔間の Exchange 相互作用である。 H_2 の電子と正孔間の引力は価電子帯の p -state が充ちていても、又伝導帯の P_ℓ -state ($P_\ell = P + p_\ell - p$) が充ちている時も、Pauli 原理に反するにもかかわらず、有効であるが、その時には、 $H_4^{(2)}$ が H_2 を打ち消して、Forbidden Process を打ち消す効果を持つ。

励起子の相対運動と重心運動に座標を分離すると、 H_2 の解は、

$$E_{n\mathbf{k}}^0 = \widetilde{E}_g + \mathbf{k}^2/2M - \mu e^4/2n^2 \epsilon_0 n^2 \quad n=1, 2, \dots$$

$$\varphi_{1\mathbf{k}} = 8 \sqrt{\pi N_{\text{exc}} a_0^3} / (1 + a_0^2 k^2)^2 \quad (n=1)$$

(2) この波動函数を使つて、非調和項の影響を計算すると、 $\Delta E^{(1)} = 0$ ($H_4^{(1)}$ の効果)、 $\Delta E^{(2)} = 42\pi E_b^{\text{exc}} N_{\text{exc}} a_0^3$ ($H_4^{(2)}$ の効果)、 $\Delta E^{(3)} = -33\pi E_b^{\text{exc}} N_{\text{exc}} a_0^3$ ($H_4^{(3)}$ の効果) となり、 N_{exc} の励起子がある時に、更にもう一つの励起子を付加えるエネルギーは、 $9\pi E_b^{\text{exc}} N_{\text{exc}} a_0^3$ と濃度と共に増加する。これは、高密度励起子を作るには、高いエネルギーの平面波状態を削り取る必要がある事を意味している。

しかし、 N_{exc} の束縛励起子がある所に、unbound electron-hole pair を作るエネルギーは、 $\Delta E^{(1)} = \Delta E^{(2)} = 0$ 、 $\Delta E^{(3)} = -80\pi E_b^{\text{exc}} N_{\text{exc}} a_0^3$ となり、 $N_{\text{exc}} = 0.0035/a_0^3$ で、励起子の束縛状態は、不安定になる事を意味する。

(3) 高密度励起子の運動方程式は、この近似では、

$$E\varphi_{\mathbf{k}} = \left(k^2/2\mu + K^2/2M + \tilde{E}_g - 2 \sum_{\mathbf{k}'} V_{\mathbf{k}'-\mathbf{k}} \varphi_{\mathbf{k}'}^* \varphi_{\mathbf{k}'} \right) \varphi_{\mathbf{k}} - \sum_{\mathbf{k}'} V_{\mathbf{k}'-\mathbf{k}} \varphi_{\mathbf{k}'} (1 - 2 \varphi_{\mathbf{k}}^* \varphi_{\mathbf{k}}) \quad (1)$$

$$\sum_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'} (\varphi_{\mathbf{k}\mathbf{k}}^* \varphi_{\mathbf{k}\mathbf{k}}) = N_{\text{exc}}.$$

一方 Fermi operator から出発して、H-F 近似をして、order parameter

$$\varphi_{\mathbf{k}}(\mathbf{k}) \equiv \sum_{\text{cv}} (\mathbf{k}, \mathbf{k}) / 2 t_{\mathbf{k}}(\mathbf{k})$$

に対する方程式を作ると、

$$\left\{ k^2/2\mu + K^2/2M + E_g + \sum_{\mathbf{k}'} V_{\mathbf{k}'-\mathbf{k}} \sqrt{1 - 4 \varphi_{\mathbf{k}'}^* \varphi_{\mathbf{k}'}} - \tilde{\mu} \right\} \varphi_{\mathbf{k}} = \sqrt{1 - 4 \varphi_{\mathbf{k}}^2} \sum_{\mathbf{k}'} V_{\mathbf{k}-\mathbf{k}'} \varphi_{\mathbf{k}'} \quad (2)$$

($\tilde{E}_g = E_g + \sum_{\mathbf{k}'} V_{\mathbf{k}'-\mathbf{k}}$) となり、 $\varphi_{\mathbf{k}}^3$ までは、(1) 式と一致するが、

(1) と (2) の差はまだ追及中である。

どの様に，励起子が不安定となり，高密度電子と正孔になるのか，更に，重心運動に関しては，Bose Condensation が起るか否かの議論は，次にゆずりたい。

高密度励起子によるマイクロ波伝導

物性研 森 垣 和 夫

最近，高密度励起子に対する関心が高まつて来ている。¹⁾ 高密度励起子において期待される現象については，前の花村氏の講演を参照して頂くことにして，ここでは，現在われわれの所で行なっている実験について述べたい。

ここでは，励起子を高密度に作るために，アルゴン・レーザー（最大 2 W）を用い，その光エネルギーに合つた励起子エネルギー（固有励起子 1 S）をもつ結晶として $\text{CdS}_{0.995}\text{Se}_{0.005}$ の混晶を撰んだ。²⁾ この実験では，マイクロ波を次のような理由又は目的で用いた。

- (1) 電気伝導を測定するのに，電極を用いなくてよい。
- (2) 静電場をかけて，励起子をイオン化した状態で，マイクロ波により伝導度を測定しうる。
- (3) 励起子のマイクロ波に対する応答として，その誘電部分によるものが期待される。励起子の寿命は $10^{-9} \sim 10^{-11}$ sec 位と考えられるが，例えば 10^{-10} sec はマイクロ波の週期に相当する。その周波数 ω と励起子寿命との間に， $\omega\tau \sim 1$ をみたす所で誘電分散が起こることが期待される。
- (4) 励起子をイオン化しない範囲での静電場によつて，励起子準位はスタルク分裂をおとす。そのスタルク準位間の遷移を，特に $n=2$ の励起子についてマイクロ波にて観測しうる可能性がある。（CdS の場合，Thomas and Hopfield³⁾ のスタルク効果の光吸収測定から，その周波数はミリ波，サブ・ミリ波領域に入る。）