

## EXCITONI MAGNETICI BIDIMENSIONALI

Sveatoslav MOSKALENKO<sup>1</sup>, Ion ZUBAC<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Institutul de Fizică Aplicată, Laboratorul de Fizică Teoretică, Chișinău, Republica Moldova

<sup>2</sup>Institutul de Fizică Aplicată, Laboratorul de Fizică Teoretică, Școala Doctorală Științe Fizice, Chișinău, Republica Moldova

\*Autorul corespondent: Ion Zubac, [ionzubac33@gmail.com](mailto:ionzubac33@gmail.com)

Interacțiunea Coulombiană electron-electron a fost dedusă luându-se în vedere anume termenii ce indică interacțiunea directă, precum și interacțiunea de schimb. Astfel expresia Hamiltonianului interacțiunii Coulombiene de schimb [1] se prezintă ca

$$H_{\text{Coul}}^{\text{exch}} = \frac{1}{2} \sum_{\vec{Q}} W(\vec{Q}) [\hat{\rho}_{\text{exch}}^{\dagger}(\vec{Q}) \hat{\rho}_{\text{exch}}(\vec{Q}) + \hat{\rho}_{\text{exch}}(-\vec{Q}) \hat{\rho}_{\text{exch}}^{\dagger}(-\vec{Q}) - | \rho_{c-v} |^2 \frac{Q^2}{2} (2N + \hat{N}_e - \hat{N}_h) + \hat{\rho}_{\text{exch}}^{\dagger}(\vec{Q}) \hat{\rho}_{\text{exch}}^{\dagger}(-\vec{Q}) + \hat{\rho}_{\text{exch}}(-\vec{Q}) \hat{\rho}_{\text{exch}}(\vec{Q})]. \quad 1)$$

În formula Hamiltonianului interacțiunii Coulombiene de schimb pot fi întâlniți termeni cu operatori pentru magneto-excitoni. Unul dintre acești operatori reprezintă operatorul de creare a magneto-excitonului  $\hat{\psi}_{\text{ex}}^{\dagger}$  și altul reprezintă operatorul de anihilare a magneto-excitonului  $\hat{\psi}_{\text{ex}}$ . În același rând sunt termeni care conțin câte doi operatori magneto-excitonici de creare sau câte doi operatori magneto-excitonici de anihilare. Dacă separăm acești membri putem obține două părți esențiale ale acestui Hamiltonian al interacțiunii Coulombiene de schimb. Prima dintre ele este prezentată prin expresia

$$\begin{aligned} \hat{H}'_{\text{exch}} &= \frac{1}{2} \sum_{\vec{Q}} W(\vec{Q}) [2 \hat{\rho}_{\text{exch}}^{\dagger}(\vec{Q}) \hat{\rho}_{\text{exch}}(\vec{Q}) - | \rho_{c-v} |^2 \vec{Q}^2 \cdot \hat{N}_e] = \\ &= \frac{| \rho_{c-v} |^2}{2} \sum_{\vec{Q}} W(\vec{Q}) \{ \vec{Q}^2 [N(\hat{\psi}_{\text{ex}}^{\dagger}(-1; \vec{Q}) \hat{\psi}_{\text{ex}}(-1; \vec{Q}) + \hat{\psi}_{\text{ex}}^{\dagger}(1; \vec{Q}) \hat{\psi}_{\text{ex}}(1; \vec{Q})) - \hat{N}_e] + \\ &+ N[(Q_x + iQ_y)^2 \hat{\psi}_{\text{ex}}^{\dagger}(-1; \vec{Q}) \hat{\psi}_{\text{ex}}(1; \vec{Q}) + (Q_x - iQ_y)^2 \hat{\psi}_{\text{ex}}^{\dagger}(1; \vec{Q}) \hat{\psi}_{\text{ex}}(-1; \vec{Q})] \}. \end{aligned} \quad 2)$$

Și partea a doua este

$$\hat{H}''_{\text{exch}} = \frac{1}{2} \sum_{\vec{Q}} W(\vec{Q}) [\hat{\rho}_{\text{exch}}^{\dagger}(\vec{Q}) \hat{\rho}_{\text{exch}}^{\dagger}(-\vec{Q}) + \hat{\rho}_{\text{exch}}(-\vec{Q}) \hat{\rho}_{\text{exch}}(\vec{Q})], \quad 3)$$

având operatorul densității

$$\hat{\rho}_{\text{exch}}^{\dagger}(\vec{Q}) = i \rho_{c-v} \sqrt{N} [Q_+ \hat{\psi}_{\text{ex}}^{\dagger}(-1; \vec{Q}) + Q_- \hat{\psi}_{\text{ex}}^{\dagger}(1; \vec{Q})] \quad 4)$$

unde

$$Q_{\pm} = (1/\sqrt{2})(Q_x \pm iQ_y) \quad 5)$$

indică în acest caz polarizările circulare ale magneto-excitonilor.

Pentru magneto-excitonul bidimensional noile stări de superpoziție se prezintă precum [1]

$$|\psi_0^{\pm}\rangle = c_1^{\pm} \left[ |\psi_{\text{ex}}(-1; \vec{k}_{\parallel})\rangle \pm e^{-2i\varphi} |\psi_{\text{ex}}(1; \vec{k}_{\parallel})\rangle \right]. \quad 6)$$

De asemenea nivelele energetice sunt dependente de vectorul de undă [1-3] planar al magneto-excitonului bidimensional

$$\begin{aligned}
 E_{ex}^+(\vec{k}_{\parallel}) &= E_{ex}^0(\vec{k}_{\parallel}) + \varepsilon_0 + I_l \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \left| \frac{\rho_{c-v}}{l_0} \right|^2 e^{-\frac{|\vec{k}_{\parallel}|^2 l_0^2}{2}} |\vec{k}_{\parallel}| l_0. \\
 E_{ex}^-(\vec{k}_{\parallel}) &= E_{ex}^0(\vec{k}_{\parallel}) + \varepsilon_0; \quad \varepsilon_0 = -\frac{1}{2} I_l \cdot \left| \frac{\rho_{c-v}}{l_0} \right|^2; \quad l_0^2 = \frac{\hbar c}{eB}. \\
 E_{ex}^0(\vec{k}_{\parallel}) &= -I_l \cdot e^{-\frac{|\vec{k}_{\parallel}|^2 l_0^2}{4}} I_0 \left( \frac{|\vec{k}_{\parallel}|^2 l_0^2}{4} \right); \quad I_l = \frac{e^2}{\varepsilon_0 l_0} \sqrt{\frac{\pi}{2}}.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Și în cazul de față  $\rho_{c-v}$  reprezintă elementul de matrice inter-bandă corespunzător coordonatei. Acesta este calculat împreună cu părțile periodice ale funcțiilor de undă ale lui Bloch ale electronilor integrate după volumul celulei elementare a rețelei cristaline.  $\vec{k}_{\parallel}$  este vectorul de undă planar al magneto-excitonului bidimensional și  $l_0$  este lungimea magnetică.

În rezultat este manifestată o nouă dependență a spectrului de energie de vectorul de undă planar al magneto-excitonului bidimensional sub influența interacțiunii Coulombiene de schimb electron-gol. Legea de dispersie obținută posedă două ramuri. Starea simetrică de superpoziție posedă o lege de dispersie de tipul conului lui Dirac în domeniul vectorilor de undă mici având viteza de grup direct proporțională cu intensitatea câmpului magnetic aplicat perpendicular pe suprafața stratului. Starea asimetrică de superpoziție își păstrează legea de dispersie obișnuită marcată de către stările magneto-excitonice și suferă tranziții cuantice dipol-active în amândouă polarizările circulare indiferent de direcția în care se propagă lumina.

#### Referințe:

1. MOSKALENKO, S., PODLESNY, I., ZUBAC, I., NOVIKOV, B. Two-dimensional magnetoexciton superposition states with Dirac cone dispersion law and quantum interference effects in optical transitions. In: *Solid State Communications*, 2020, 312, pp. 113714. Doi: 10.1016/j.ssc.2019.113714.
2. MOSKALENKO, S.A., PODLESNY, I.V., ZUBAC, I.A., NOVIKOV, B.V. Optical selection rules for the quantum transitions from the ground state of the crystal to the superposition states of the two-dimensional magneto-excitons. In: *Proceedings SPIE*, 2020, 11718, pp. 117180Q. Doi: 10.1117/12.2570819.
3. MOSKALENKO, S.A., PODLESNY, I.V., ZUBAC, I.A., NOVIKOV, B.V. Superposition states of the two-dimensional magnetoexcitons with Dirac cone dispersion law and quantum interference effects in optical transitions. In: *IFMBE Proceedings*, 2020, 77, pp. 13-17. Doi: 10.1007/978-3-030-31866-6\_3.