

مطالعه دورنگی خطی نانو ذرات بیضی گون نقره

آتوسا خلیلی زاده^۱، ابراهیم مددی^۲ و مجتبی نصیری زرنندی^۱

۱- زنجان، دانشگاه زنجان، دانشکده علوم

۲- بوبین زهرا، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوبین زهرا، دانشکده علوم مهندسی و فیزیک

چکیده - در این مقاله از روش دو قطبی‌های جفت شده برای مطالعه پاسخ مگنتو-اپتیکی نانو ذرات بیضی گون نقره استفاده می‌کنیم و دورنگی خطی این ذرات را در حضور میدان مغناطیسی استاتیکی کوچک مورد بررسی قرار می‌دهیم. دو رنگی خطی نانو ذره تنها به صورت تحلیلی محاسبه می‌شود و نشان می‌دهیم که دایمر این نانو ذرات نیز دو رنگی خطی بروز می‌دهد. دو رنگی خطی این نانو ذرات به جهت نور فرودی نسبت به امتداد قطر بزرگ بیضی گون و جهت میدان مغناطیسی حساس است.

کلید واژه- بیضی گون، تقریب دو قطبی، دورنگی، سطح مقطع جذب.

Investigation of linear dichroism in spheroidal silver nanoparticles

A. Khalilizadeh¹, E. Madadi², M. Nasiri¹

1- Department of Physics, Faculty of Science, University of Zanjan

2- Department of Science Engineering and Physics, Buein Zahra Technical University, Buein Zahra, Qazvin

Abstract- In this paper we apply the coupled dipole method to study the magneto-optical response of silver nanoparticles. We study the linear dichroism of spheroidal nanoparticles in the presence of small static magnetic field. The dichroism of single nanoparticle is calculated analytically. We show that single and dimer of spheroidal nanoparticles exhibit linear dichroism which depends on the direction of incident light with respect to direction major axis of spheroid and the static magnetic field.

Keywords: spheroid, dipole approximation, dichroism, absorption cross section.

۱- مقدمه

که k عدد موج در محیط است. α و β مختصه‌های دکارتی هستند [3].

۲-۱- تانسور قطبش یک نانوذره

برای الکترونی که تحت میدان پایای مغناطیسی $\vec{B} = B(b_x, b_y, b_z)$ و میدان نوسانی الکتريکی $\vec{E}(t) = \vec{E}(\omega) \exp(-i\omega t)$ نور قرار دارد، معادله حرکت الکترون را حل می‌کنیم. در این مقاله کلیه محاسبات در دستگاه cgs انجام شده است. برای میدان مغناطیسی کمتر از یک تسلا، فرکانس سیکلوترونی $\omega_c = eB/(m_e c)$ از فرکانس نور فرودی بسیار کوچکتر است. بنابراین تانسور ضریب دی‌الکتريک توده ماده تا مرتبه اول ω_c / ω به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon(\omega) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx}(\omega) & iG\omega_c b_z & -iG\omega_c b_y \\ -iG\omega_c b_z & \varepsilon_{xx}(\omega) & iG\omega_c b_x \\ iG\omega_c b_y & -iG\omega_c b_x & \varepsilon_{xx}(\omega) \end{pmatrix} \quad (۳)$$

$$G = \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\Gamma)} \quad \text{که} \quad \varepsilon_{xx}(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\Gamma\omega}$$

فرکانس پلاسمونی $\omega_p = \sqrt{4\pi n_e e^2 / m_e}$ ، جرم الکترون m_e ، بار الکترون e ، چگالی الکترون‌های رسانش n_e و Γ ثابت آسایش هستند [۱]. با توجه به رابطه (۳) عناصر غیر قطری ماتریس بسیار کوچک هستند و اثر مغناطیوآپتیکی ناچیز توده ماده را نشان می‌دهند. نانوذره‌ای که در نظر می‌گیریم بصورت بیضی‌گون با نیم‌محور بزرگ b و نیم‌محور کوچک a است. در ضمن شعاع مقطع دایره‌ای بیضی‌گون نیز می‌باشد. رابطه قطبش‌پذیری این ذره با ضریب دی‌الکتريک $\vec{\varepsilon}$ در دستگاه مختصات دکارتی متصل به ذره عبارتست از [۴]:

$$\vec{\alpha}_j = \frac{a^2 b}{3} \frac{\vec{\varepsilon} - \varepsilon_m \vec{I}}{\varepsilon_m \vec{I} + (\vec{\varepsilon} - \varepsilon_m \vec{I}) L_j}, \quad j = 1, 2 \quad (۴)$$

که در آن $\vec{\varepsilon}$ و ε_m ضریب دی‌الکتريک ذره و محیط و \vec{I} ماتریس واحد است و همچنین L_1 و L_2 به صورت:

$$L_1 = \left(\frac{a^2 b}{2}\right) \int_0^\infty \frac{dq}{(b^2 + q)f(q)}$$

کسر انرژی جذب شده توسط ذراتی که تحت تابش الکترومغناطیسی قرار می‌گیرند با سطح مقطع جذب آنها تعیین می‌گردد. اهمیت این کمیت بدلیل قابلیت اندازه‌گیری آن در آزمایشات تجربی است. وقتی نانوذرات فلزهای بی‌اثر توسط تابش الکترومغناطیس برانگیخته می‌شوند، نوسان جمعی الکترون‌های رسانشی رخ می‌دهد که منجر به تشدید پلاسمونی و جذب بیشتر در طول موج‌های خاصی می‌شود. در صورتی که نور تابشی دارای قطبش خطی به ذره دست‌ان بتابد، با توجه به عدم تقارن هندسی سیستم، سطح مقطع جذب برای قطبش‌های متعامد خطی نور متفاوت است [1]. این تفاوت دورنگی خطی است که پایه و اساس طیف سنجی دورنگی خطی می‌باشد. این طیف سنجی در آزمایشگاه‌های زیستی بسیار پر کاربرد است و برای تعیین جهت‌گیری ذره مورد مطالعه از آن استفاده می‌شود [۲].

۲- مدل ریاضی

هرگاه طول موج نور تابشی از اندازه ذره تحت تابش بسیار بزرگتر باشد می‌توان از تقریب دوقطبی برای مطالعه بر هم کنش آن با نور استفاده کرد. در این تقریب، هر ذره یک دوقطبی نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود. اگر ماتریس قطبش‌پذیری ذره واقع در \vec{r}_i را α بنامیم و ممان دوقطبی آن را با \vec{d}_i نشان دهیم با توجه به اینکه میدان موضعی در \vec{r}_i ، حاصل برهم‌نهی میدان تابشی و تمامی میدان‌های ثانویه پراکنده شده توسط سایر دوقطبی‌ها هست خواهیم داشت:

$$\vec{d}_i = \varepsilon_m \vec{\alpha} [\vec{E}_{inc}(\vec{r}_i) + \sum_j \vec{G}(\vec{r}_i - \vec{r}_j) \cdot \vec{d}_j] \quad (۱)$$

که عبارت $\vec{G}(\vec{r}_i - \vec{r}_j) \cdot \vec{d}_j$ نشان دهنده میدان تابشی از دوقطبی است که توسط ذره j ام در مکان ذره i ام تولید می‌شود و $\vec{G}(\vec{r}_i - \vec{r}_j)$ با رابطه زیر بدست می‌آید:

$$G_{\alpha\beta}(\vec{r}_{ij}) = [(1 - ik|\vec{r}_{ij}|) \left(\frac{3(\vec{r}_{ij})_\alpha (\vec{r}_{ij})_\beta - |\vec{r}_{ij}|^2 \delta_{\alpha\beta}}{\varepsilon_m |\vec{r}_{ij}|^5} \right) + k^2 \left(\frac{|\vec{r}_{ij}|^2 \delta_{\alpha\beta} - (\vec{r}_{ij})_\alpha (\vec{r}_{ij})_\beta}{\varepsilon_m |\vec{r}_{ij}|^3} \right)] e^{ik|\vec{r}_{ij}|} \quad (۲)$$

سرانجام با استفاده از رابطه زیر می توان سطح مقطع جذب باریکه فرودی توسط ذره را محاسبه کرد [۶]:

$$\sigma = \frac{4\pi\omega}{\epsilon_m^{3/2} c |\vec{E}|^2} \text{Im} \sum_i \vec{P}_i^+ \vec{\alpha}_L^{-1} \vec{P}_i^- \quad (10)$$

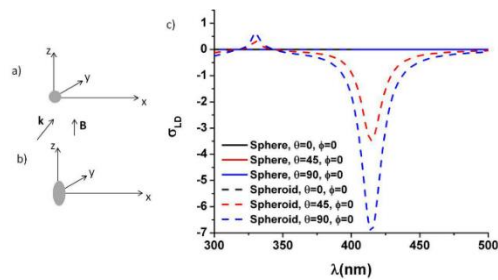
دورنگی خطی در حقیقت تفاوت سطح مقطع جذب نور با دو قطبش خطی عمود بر هم است که طبق رابطه زیر:

$$\sigma_{LD} = \sigma_\theta - \sigma_\phi \quad (11)$$

بدست می آید.

۳- نتایج

در این بخش نتایج دورنگی خطی، مربوط به تک ذره کروی و بیضی گون نقره به همراه دایمر ذرات کروی و بیضی گون، ارایه می گردد. ضرایب شکست نقره از مرجع [۷] استخراج شده اند. نیم محور بزرگ ذرات مورد بررسی 25nm، نیم محور کوچک آنها 11.6nm و شعاع کره هم حجم 15nm است. در تمام نمودارهای ارایه شده، طیف دورنگی خطی به مساحت دایره ای به شعاع برابر با نیم محور بزرگ بیضی گون بهنجار شده است. میدان مغناطیسی استاتیک در همه نمودارها به اندازه 8000 Gauss و در جهت محور z در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: نمودار دو رنگی خطی تک ذره بیضی گون و کروی برای تابش فرودی در جهات مختلف. خطوط پر نمودار دو رنگی تک ذره کروی و خطوط خط چین دو رنگی ذره بیضی گون را نشان می دهد.

شکل ۱ نشان می دهد که یک ذره کروی در حضور میدان مغناطیسی استاتیک که تحت تابش نور قطبیده خطی است از خود دورنگی خطی نشان نمی دهد و به سبب تقارن هندسی، چرخش در بوجود آمدن دورنگی خطی تاثیر ندارد. اما ذره بیضی گون در همین شرایط از خود دورنگی نشان می دهد. نمودارهای مربوط به دورنگی تک

$$L_2 = \left(\frac{a^2 b}{2}\right) \int_0^\infty \frac{dq}{(a^2 + q)f(q)} \quad (5)$$

است. در ضمن $f(q) = (a^2 + q)\sqrt{b^2 + q}$ است. برای اینکه بتوانیم این روابط را برای نانو ذرات استفاده نماییم، از تصحیح زیر استفاده می شود:

$$\Gamma = \Gamma_{bulk} + \frac{v_f}{L_{eff}} \quad (6)$$

که در آن L_{eff} طول پوشش آزاد میانگین است که از رابطه $L_{eff} = 4V/S$ بدست می آید، که در آن V حجم ذره S و مساحت سطح ذره مورد بررسی است [۵]. با استفاده از رابطه (۴) و تقریب تا مرتبه اول ω_c / ω قطبش پذیری به صورت رابطه زیر ساده می شود:

$$\alpha_j(\omega) = \frac{a^2 b}{3} \begin{pmatrix} \alpha_{jxx} & i\omega_c b_z F_j & -i\omega_c b_y F_j \\ -i\omega_c b_z F_j & \alpha_{jxx} & i\omega_c b_x F_j \\ i\omega_c b_y F_j & -i\omega_c b_x F_j & \alpha_{jxx} \end{pmatrix} \quad (7)$$

که $\alpha_{jxx} = \frac{\epsilon_{xx} - \epsilon_m}{\epsilon_m + (\epsilon_{xx} - \epsilon_m)L_j}$ ، $j = 1, 2$ و

$F_j = \frac{\epsilon_m G}{[\epsilon_m + (\epsilon_{xx} - \epsilon_m)L_j]^2}$ است. به این دلیل که

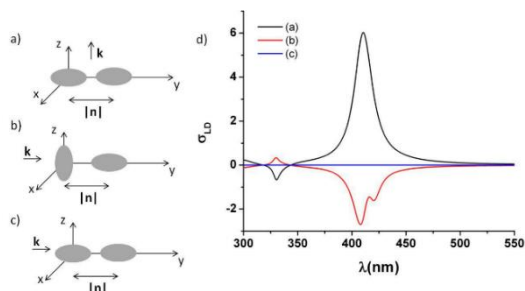
مولفه های قطری قطبش پذیری در دستگاه متصل به ذره در حضور میدان مغناطیسی خود ماتریس مرتبه ۳ هستند قطبش پذیری نهایی طبق رابطه زیر بیان می شود:

$$\vec{P} = \epsilon_m \alpha_1 (\vec{E} \cdot \hat{e}_x) \hat{e}_x + \epsilon_m \alpha_1 (\vec{E} \cdot \hat{e}_y) \hat{e}_y + \epsilon_m \alpha_3 (\vec{E} \cdot \hat{e}_z) \hat{e}_z \quad (8)$$

اکنون می توانیم با استفاده از ماتریس دوران، قطبش پذیری ذره از دستگاه متصل به ذره را با رابطه $\vec{\alpha}_L = R \vec{\alpha}_p R^{-1}$ به دستگاه آزمایشگاه منتقل نماییم، که ماتریس دوران R به صورت زیر می باشد:

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \phi & -\sin \phi & \sin \theta \cos \phi \\ \cos \theta \sin \phi & \cos \phi & \sin \theta \sin \phi \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (9)$$

و θ و ϕ به ترتیب زوایای قطبی و سمتی ذره هستند.



شکل ۲: نمودار دورنگی خطی دیمر نانو ذرات بیضی گون برای جهت گیری های مختلف ذرات و جهت های تابش مختلف.

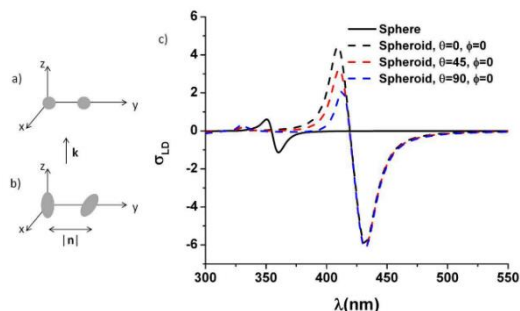
وضعیتی که شعاع بزرگ یک ذره و شعاع کوچک ذره دیگر بر محور دیمر قرار بگیرد و بردار موج موازی محور دیمر بتابد، نمودار دورنگی کمی پیچیده تر شده و چهار اکستریم خواهد داشت (شکل b).

به طور خلاصه این مطالعه نشان می دهد تک ذره بیضی گون به دلیل عدم تقارن هندسی دورنگی خطی دارد. دورنگی خطی تک ذره و دیمر ذرات بیضی گون به جهت تابش باریکه فرودی و جهت گیری این نانو ذرات نسبت به میدان مغناطیس بستگی دارد.

مراجع

- [1] C. Bohren, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, p.130-157, Wiley, 1998.
- [2] B. M. Bulheller, A. Rodger, J.D. Hirst, "Circular and linear dichroism of proteins", *Phys.Chem.*, Vol. 9, No. 17 pp. 2020-2035, 2007.
- [3] S. Pakdel, M. Miri, "Faraday rotation and circular dichroism spectra of gold and silver nanoparticle aggregates", *Phys. Rev. B.*, Vol. 86, No. 23, pp. 1-10, 2012.
- [4] A. H. Sihvola, "Dielectric polarizability of a sphere with arbitrary anisotropy", *Opt. Lett.*, Vol. 19, No. 7, pp. 430-432, 1994.
- [5] A. Coronado, G. C. Schatz, "Surface plasmon broadening for arbitrary shape nanoparticles: A geometrical probability approach", *J. Chem. Phys.*, Vol. 119, No. 7, pp. 3926-3924, 2003.
- [6] A. Mohammad, M. Miri, "Magnetic linear and circular dichroism of planar sets of hollow silver nanoparticles: engineering the spectra by hollow size", *JOSA B.*, Vol. 33, Issue 4, pp. 711-719, 2016.
- [7] P. B. Johnson, R. W. Christy, "Optical Constants of the Noble Metals", *Phys. Rev. B.*, Vol. 6, No. 12, pp. 4370-4379, 1972.

ذره بیضی گون شامل دو اکستریم مثبت و منفی است. با تغییر زاویه بردار موج نور تابشی، محل دو اکستریم ثابت باقی می ماند اما دامنه آن تغییر می یابد، به طوریکه در وضعیت تابش عمود یا $\vec{k} \cdot \vec{B} = 0$ بیشترین دامنه را داریم و با کاهش زاویه تابش، دامنه نمودار دورنگی نیز کاهش می یابد. در زاویه صفر (تابش موازی قطر بزرگ بیضی گون) دورنگی از بین می رود.



شکل ۳: دورنگی خطی دیمر بیضی گون و کروی برای چرخش های مختلف ذره دوم بر روی محور y.

شکل ۲ نشان می دهد که دورنگی برای یک دیمر ذرات کروی در طول موج های کوتاه تری نسبت به دیمر ذرات بیضی گون رخ می دهد. نمودار دورنگی خطی برای ذرات بیضی گون، دو اکستریم مثبت و منفی دارد. با چرخش یکی از ذرات دیمر به روی محور y ، دامنه برای بخش منفی نمودار و محل کمینه تقریباً ثابت می ماند اما بخش مثبت نمودار با افزایش زاویه از صفر تا 90° کاهش دامنه می یابد و محل بیشینه نیز اندکی به سمت طول موج های بلندتر جابجا می شود. شکل ۳ نشان می دهد که وقتی شعاع بزرگ هر دو ذره بیضی گون روی محور دیمر بوده و بردار موج موازی محور دیمر باشد، دورنگی خطی مشاهده نمی شود (شکل c). اما اگر در همین وضعیت دیمر، بردار موج عمود بر محور دیمر باشد، شاهد دورنگی با دو اکستریم مثبت و منفی خواهیم بود (شکل a).