



بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹



کد مقاله : ۱-۲۴۹۸-۱۰-A

بررسی تعداد امواج در نیروی وارد بر ذره کروی در انبرک نوری چند پرتویی

علی سلیمانی^۱، عبدالناصر ذاکری^۳

^۱شیراز، میدان ارم، پردیس علوم، بخش فیزیک، کدپستی: ۷۱۹۴۶-۸۴۷۹۵

^۲a.soleimani9573@gmail.com

^۳zakeri@physics.susc.ac.ir

چکیده- در این گزارش ما تاثیر تعداد مختلف موج تداخل کننده N و قطبش وابسته به آنها را بر نیروی وارد بر ذره کروی به شعاع دلخواه که در میدان تداخلی این امواج قرار گرفته است را بصورت عددی بررسی کرده ایم. ما با جداسازی نیروی وارد بر ذره به دو قسمت پایستار و ناپایستار، تاثیر تعداد امواج تداخل کننده بر آن ها را نیز بررسی کردیم.
کلید واژه ها: انبرک نوری، انبرک نوری تداخلی چند پرتویی، جداسازی نیروها

Investigation of the number of beams in the force acting on the spherical particle in multi-beam optical tweezers

Ali Soleimani^{1,2}, Abdolnasser Zakery^{1,3}

¹Physics department, College of science, Eram square, Fars, 71946-84795, Iran

²a.soleimani9573@gmail.com

³zakeri@physics.susc.ac.ir

Abstract- in this report, we have studied numerically study the effect of different numbers of interfering waves N and their related polarization on the force acting on the spherical particle of an arbitrary radius located in the interfering field of these waves. We also examined the effect of the number of interfering waves on the conservative and nonconservative parts of the force.

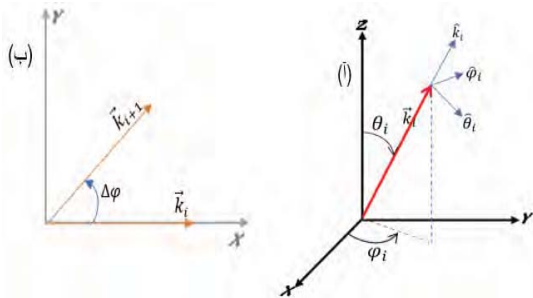
Keywords: optical tweezer, multibeam optical tweezer, decomposition of forces

($r \cong \lambda$)، فراتر از حد اپتیک هندسی و محدوده رایلی مورد بررسی قرار نگرفته بود. ما شبیه آنچه در [5] آمده است نیروی حاصل از N پرتو تخت بر یک ذره کروی با شعاع دلخواه را توانستیم به دو عامل گرادیانی و پراکنده کننده جدا سازی کنیم و تاثیرات تعداد موج‌ها و قطبش وابسته به آنها را بررسی کنیم.

تئوری

میدان الکتریکی کل برای بررسی نیروی وارد بر ذره را میتوان بصورت جمع امواج الکتریکی تخت برهمکنش کننده نوشت

که در آن $\hat{\theta}$ و $\hat{\varphi}$ بردار یکه قطبی و سمتی در فضای کروی می‌باشند (مطابق شکل-۱). k بردار موج و w فرکانس دایروی در محیط زمینه می‌باشند.



شکل-۱. (آ) یک نمای پیشنهادی سه بعدی برای چپش مورد نظر را نشان می‌دهد. که در آن \hat{k} جهت بردار موج، $\hat{\theta}$ جهت افزایش زاویه قطبی و $\hat{\varphi}$ جهت افزایش زاویه سمتی را نشان می‌دهد. (ب) یک نمای دو بعدی از دو بردار موج دلخواه در صفحه xoy را نشان میدهد زمانی که θ برابر 90° فرض شود و $\Delta\varphi$ زاویه بین دو بردار موج را نشان می‌دهد که برابر است با $\frac{2\pi}{N}$ که N تعداد پرتوها می‌باشد.

دو عدد مختلط p و s جهت قطبش میدان الکتریکی را نشان می‌دهد. E_0 بزرگی میدان الکتریکی، عددی بزرگتر از صفر است.

مقدمه

نور حامل تکانه است و می‌تواند آن را به شی‌ای که در مسیرش قرار دارد منتقل نماید و به آن شی نیرو یا گشتاور وارد کند که با نام فشار تابشی شناخته می‌شود. اولین بار کپلر با بررسی دم ستاره‌های دنباله دار فشار تابشی حاصل از نور خورشید را بیان نمود. ماکسول توانست در الکترومغناطیس کلاسیک فشار تابشی امواج الکترومغناطی را فرمول بندی نماید.

آرتور اشکین با استفاده از فشار تابشی حاصل از دو نورلیزر متقابل بصورت تجربی ذراتی در ابعاد میکرون را بدام انداخت. پس از آن E_0 در سلسله E_2 توانسته E_1 و E_0 (پرتو) E گوسی از یک عدد s به s_0 تبدیل $E_0(p\hat{\theta}_i + s\hat{\varphi}_i)$ این $E_0(p\hat{\theta}_i + s\hat{\varphi}_i)$ کانونی کند و ذرات میکرونی پلی استایرن را بدام بیاندازد. این روش به نام انبرک نوری شناخته می‌شود.

بدام اندازی نوری یک روش غیرتماسی برای دست کاری ذرات می‌باشد. بدام اندازی ذرات بوسیله نور تنها به بدام اندازی تک ذره محدود نمی‌شود و می‌توان با استفاده از روش‌ها و متدهای گوناگون تعداد زیادی ذره را بطور مستقل بدام انداخت [1] از جمله این روش‌ها می‌توان به انبرک نوری هولوگرافیک [2] و یا انبرک نوری روبشی [3] اشاره کرد. یکی از روش‌های موثر و ساده برای بدام اندازی تعدادی ذرات استفاده از بلورهای نوری است که از تداخل چند بیم بوجود می‌آید [4].

در این مقاله نیروی حاصل از N موج تخت را که (شکل-۱) همگی در صفحه xoy قرار دارند و بر ذره کروی وارد می‌شود بررسی شده است. همچنین چگونگی تاثیر تعداد امواج تداخل کننده و قطبش آنها در نیروی وارد شده بر ذره مورد بررسی قرار گرفته است. در بررسی‌های گذشته نیروی وارد بر ذره در بلور نوری در محدوده اپتیک هندسی ($r \gg \lambda$) همچنین در محدود پرایلی [4] ($r \ll \lambda$) مورد مطالعه قرار گرفته است. ذرات مای یعنی زمانی که

میانگین نیروی اپتیکی F که از طرف میدان اپتیکی بر ذره وارد می‌شود را می‌توان بر اساس تانسور تنش ماکسول یا بر اساس تئوری کلی لورنتز-مای محاسبه نمود و همچنین میانگین زمانی نیروی اپتیکی F که از طرف میدان‌ها به ذره کروی که داخل آن قرار گرفته است را می‌توان جمع دو نیروی مانع F_{int} و نیروی پس راننده F_{rec} نوشت [6] که:

$$\begin{aligned} F_{int} &= F_{int}^e + F_{int}^m \\ F_{rec} &= F_{rec}^e + F_{rec}^m + F_{rec}^x \end{aligned} \quad (1)$$

هرکدام از جمله‌های رابطه (۱) را می‌توان بصورت جمع چند قطبی الکتریکی و مغناطیسی نوشت. بطور مثال بصورت $F_{int}^e = \sum_{l=1}^{\infty} F_{int}^{e(l)}$ نوشت که:

$$F_{int}^{e(l)} =$$

که در آن a_l ضریب مای می‌باشد. N تعداد پرتوهای تداخل کننده هست. Q_l^2 و Q_l^1 دو تابع کمکی هستند که جزئیات آن در [7] آمده است.

(۲)

$$\begin{aligned} Z_{i,j}^{e_l} \\ Z_{i,j}^{m_l} \end{aligned}$$

که

(۳)

5

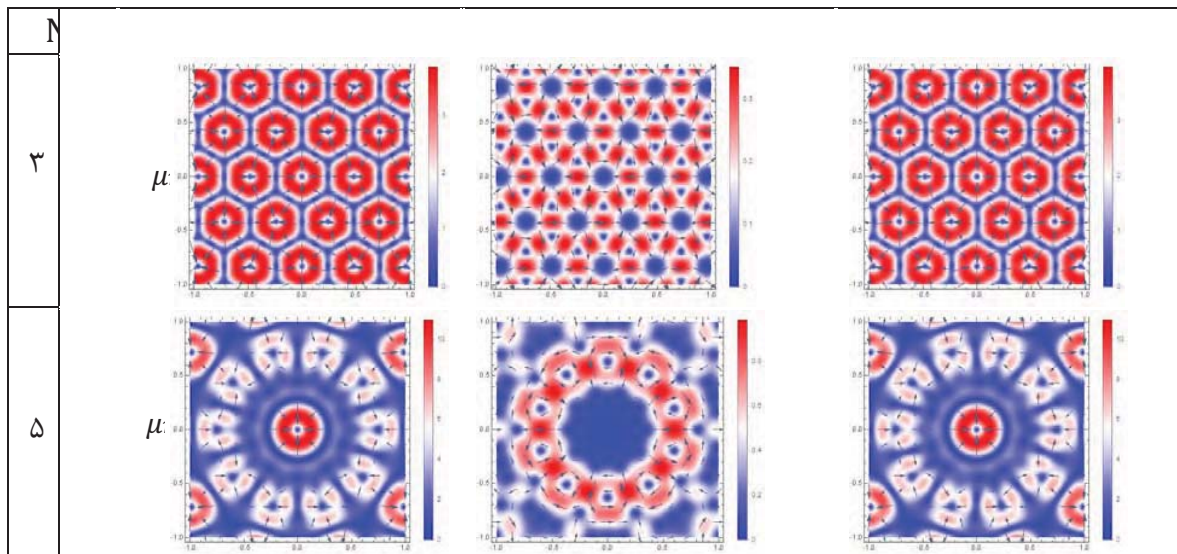
و $k_i \times E_i B_i$ می‌باشد.

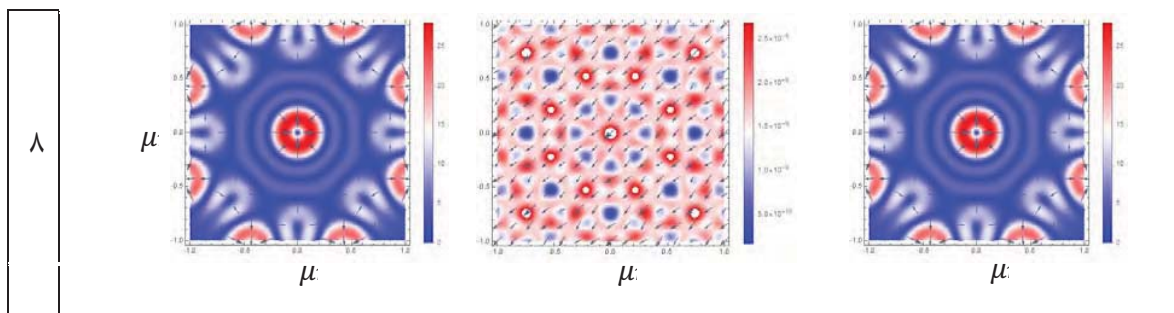
داده‌ها و نتایج

در این مقاله فقط نیروی شعاعی وارد بر ذره در صفحه XOY محاسبه شده است و هر نقطه در نمودارهای دوبعدی نیروها نشان دهنده‌ی نیروی شعاعی وارد بر ذره هنگامی

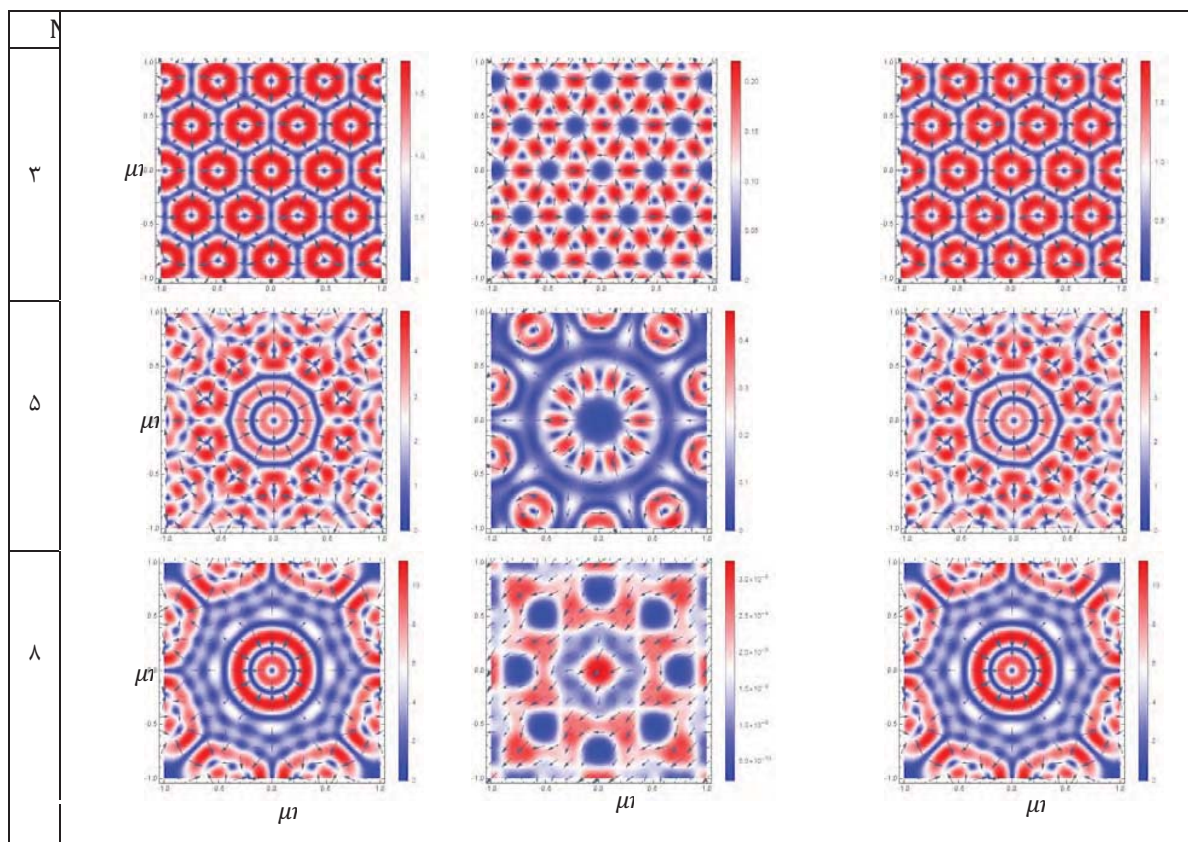
که مرکز ذره تمام نیروهای اندازه‌گیری شده در واحد $\frac{\epsilon_0 E_0^2}{k^2}$ بیان شده است. همچنین با جداسازی قسمت پایستار و قسمت ناپایستار نیرو [7]، نیروی گرادیانی که سبب تله اندازی ذره و نیروی پراکنده کننده محاسبه شده است.

نیروی کل، نیروی گرادیانی و نیروی پراکنده کننده وارد بر ذره کروی به اندازه $(a = 100 \mu m)$ هنگامی که با امواج تداخل کننده که طول موج آنها همگی $\lambda = 720 \text{ nm}$ هست برهمکنش می‌کند برای دو حالت: ۱. زمانی که $(p, s) = (1, 0)$ یعنی میدان الکتریکی در جهت محور Z و موازی با صفحه تابش است (قطبش p) (شکل-۲) ۲. زمانی که $(p, s) = (0, 1)$ یعنی میدان الکتریکی عمود صفحه تابش است (قطبش s) محاسبه نموده‌ایم (شکل-۳).





شکل-۲. اندازه و جهت نیروهای وارد بر ذره از تداخل تعداد امواج مختلف N که همگی دارای قطبش خطی p در صفحه $z=0$ نمایش می‌دهد. در ستون اول نیروی گرادیانی F_g در ستون دوم نیروی پراکنده کننده F_s و در ستون سوم نیروی کل F_t وارد بر ذره را نمایش می‌دهد.



شکل-۳. اندازه و جهت نیروهای وارد بر ذره از تداخل تعداد امواج مختلف N که همگی دارای قطبش خطی s در صفحه $z=0$ نمایش می‌دهد. در ستون اول نیروی گرادیانی F_g در ستون دوم نیروی پراکنده کننده F_s و در ستون سوم نیروی کل F_t وارد بر ذره را نمایش می‌دهد.

کننده F_s ناپایستار است. همچنین می‌توان نشان داد که $F_g \propto \nabla|E|^2$: [7] و $F_s \propto \text{Re}(E \times B^*)_{||}$ است. هنگامی که قطبش میدان الکتریکی p است میدان‌های الکتریکی در مرکز با یکدیگر همفاز هستند و تداخل سازنده می‌کنند و در مرکز بیشترین مقدار میدان و در اطراف بطور پیوسته کاهش می‌یابد و پتانسیل حاصل در مرکز یک دره عمیق دارد که سبب ایجاد یک تله اندازی پایدار می‌شود.

اختلاف نیروها در شکل-۲ با شکل-۳ را می‌توان بخاطر تاثیرات جهت قطبش میدان‌ها بیان نمود و برای بیان این منظور نیروی گرادیانی و پراکنده کننده طبق رابطه (۱) محاسبه و جداسازی شده است و نیرو اپتیکی را بصورت $F = F_g + F_s$ که $F_g = -\nabla\phi$ و $F_s = \nabla \times \psi$ بیان نمود که ϕ پتانسیل اسکالر و ψ پتانسیل برداری می‌باشد. در نتیجه می‌توان گفت نیروی گرادیانی F_g پایستار و نیروی پراکنده

منابع

- [1] H. Misawa, K. Sasaki, M. Koshioka, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 60, no. 3, pp. 310–312, 1992.
- [2] D. G. Grier and Y. Roichman, *Appl. Opt.*, vol. 45, no. 5, p. 880, Feb. 2006.
- [3] C. Mio, T. Gong, A. Terray, and D. W. M. Marr, “,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 71, no. 5, pp. 2196–2200, May 2000.
- [4] M. Mohammadnezhad and A. Hassanzadeh, *J. Nanophotonics*, vol. 11, no. 3, p. 036007, Jul. 2017.
- [5] Y. Jiang, J. Chen, J. Ng, and Z. Lin, vol. 29, Apr. 2016.
- [6] J. Chen, J. Ng, Z. Lin, and C. T. Chan, *Nat. Photonics*, vol. 5, no. 9, pp. 531–534, Sep. 2011.
- [7] Y. Jiang, H. Lin, X. Li, J. Chen, J. Du, and J. Ng, *ACS Photonics*, vol. 6, no. 11, pp. 2749–2756, Nov. 2019.
- [8] J. Du *et al.*, *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, p. 18042, Dec. 2017.

هنگامی که قطبش میدان الکتریکی s است، جمع برداری میدان های الکتریکی در مرکز صفر است و در اطراف بیشتر می شود و یک گرادیان شدت بر خلاف حالت قبل داریم که سبب یک تله اندازی ناپایدار در مرکز می شود. یعنی اگر ذره مقدار کمی از وضعیت تعادل یعنی مرکز جابجا شود نیروی گرادیانی آن را به سمت اطراف می کشاند. این حالت برای زمانی که نسبت ضریب شکست ذره به ضریب شکست محیط اطراف کمتر از ۱ شود مانند حالت قطبش p سبب به دام اندازی پایدار ذره در مرکز می شود.

همچنین با بررسی شکل ۲ و ۳ دیده می شود هنگامی که تعداد موج های تداخل کننده زوج است نیروی پراکننده کننده تقریباً برابر صفر $F_x \cong 0$ است و $F_y \cong F$ می شود. این ناشی از آن است که در این حالت ها امواج ایستاده است و موج ایستاده نیروی کاملاً پایستار بر ذره وارد می کند [8].

همچنین همانطور که در شکل ۲ و ۳ دیده می شود با افزایش تعداد موج های برهمکنش کننده اندازه نیروی وارد بر ذره افزایش پیدا می کند در نتیجه ذره را می توان بهتر به دام انداخت.

نتیجه گیری

در این مقاله ما تاثیر تعداد مختلف موج تداخل کننده N و قطبش وابسته به آنها را بر ذره کروی به شعاع دلخواه که در میدان تداخلی این امواج قرار گرفته است را بصورت عددی بررسی کردیم. در حالت که قطبش امواج p باشد دیدیم که هرچه تعداد امواج تداخل کننده بیشتر شود نیروی گرادیانی بیشتر می شود و پتانسیل وابسته به آن عمیق تر می شود و ذره بطور پایدار تر در مرکز به دام انداخته می شود. همچنین زمانی که قطبش امواج s باشد ذره در مرکز بطور ناپایدار به دام افتاده است و با کمی اختلال از وضعیت تعادل به سمت حلقه اطراف کشیده می شود.