بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

# چرخش سریع ذرات فلزی کوچک در تله‌ی نوری

فائقه حاجی زاده[۱و۲]، لی شاو[۲] و میکائیل شل[۲]

۱- دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان، زنجان

۲- گروه بیونانوفوتونیک، دانشگاه چالمرز، گوتنبرگ، سوئد

چکیده – انبرک نوری در چند دهه‌ی اخیر به یک ابزار قدرتمند در علوم مختلف تبدیل شده است. اساس کار انبرک نوری، انتقال اندازه حرکت فوتون‌ها به ذرات میکرو- و نانومتری است که می‌توان با کمک آن ذرات را معلق نگه داشت، آنها را جابه‌جا کرد و نیروهایی در ابعاد پیکونیوتن را اندازه گرفت. در این مقاله نشان می‌دهیم که قطبش دایره‌ای و انتقال اندازه حرکت زاویه‌ای نور به ذرات جاذب فلزی باعث چرخش آنها می‌شود. سرعت چرخش ذرات در تله‌ی نوری وابسته به توان لیزر و شکل ذرات است و برای ذرات کروی به طرز حیرت‌انگیزی به چند کیلوهرتز نیز می‌رسد.

کلید واژه- انبرک نوری، نانوذرات فلزی، گشتاور نوری، اندازه حرکت زاویه‌ای

# Fast rotation of small metallic particles

Faegheh Hajizadeh[۱,۲], Lei Shao[۲], Mikael Käll [۲]

۱- Department of physics, Institute for advanced studies in basic sciences (IASBS), Zanjan, Iran.

۲- Department of Applied Physics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden

Abstract- Optical tweezers have become powerful tools in many areas. By transferring light momentum from photons to micro- and nano-particles, one could immobilize submicron particles, transport them and also measure sub-picoNewton forces. In this paper we show by utilizing the angular momentum of a circularly polarized light, metallic nano particles rotate. Rotation speed depends to laser power and particle shape and size. Here, we show that rotation speed for round shape particle raise up to few kHz.

Keywords: Optical tweezers, Metallic nano particles, Optical torque, Angular momentum

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30 ]



این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

## ۱- مقدمه

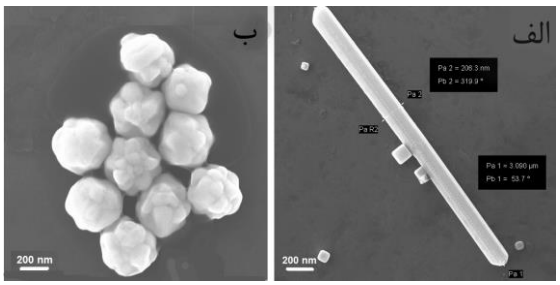
تله‌ی نوری یا انبرک نوری در اصل یک باریکه‌ی لیزر با توزیع شدت گاوسی است که توسط یک عدسی با گشودگی عددی بالا کانونی شده است [۱،۲]. با کمک روش انبرک نوری می‌توان به ذرات میکرونی با ضریب‌شکست بزرگتر از محیط اطراف نیروی پیکونیوتنی وارد کرد. این نیرو با انتقال تکانه‌ی نور به جسم ایجاد می‌شود. در طول سه دهه‌ی گذشته انبرک نوری به ابزار بسیار مهمی برای پژوهش در زمینه‌های مختلف علوم تبدیل شده است. در مطالعات زیست شناختی با توجه به پیشرفت‌های وسیع در این زمینه، استفاده از تکنیک انبرک نوری برای بررسی نیروهای ساختاری درون ماکرومولکول‌های زیستی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعات، میکروکره‌های دی‌الکتریک به عنوان دستگیره‌ای برای پلیمرهای زیستی استفاده می‌شوند و با کمک میکروکره‌ها به پلیمرهای مذکور نیرو وارد می‌شود. از طرف دیگر با توجه به پیشرفت‌هایی که در زمینه‌ی تله‌اندازی نوری نانوذرات فلزی به دست آمده است، امروزه می‌توان ذراتی به کوچکی ۱۰ نانومتر را با کمک انبرک نوری در تله‌ی نوری معلق نگه داشت [۳]. تله‌اندازی نوری ذرات نانومتری امید فراوانی در علوم نانوتکنولوژی، علوم زیستی و نانوالکترونیک به‌وجود آورده است. به عنوان مثالی از این نوع کاربردها می‌توان نانوذرات فلزی را به داخل سلول‌های زیستی فرستاد و با تله انداختن این ذرات در داخل سلول زنده، میکرودستکاری‌های مختلف مانند اِعمال نیرو به اجزای داخلی سلول انجام داد. از طرفی نانوذرات فلزی در تله‌ی نوری، با توجه به وجود الکترون‌های آزاد بر روی سطح آنها، جذب بالایی دارند. تولید گرما در حدّ دمای ذوب فلز، در فضایی به‌اندازه‌ی کسری از میکرون، کاربردهای زیادی برای نانوذرات فلزی در پزشکی ایجاد کرده است[۴]. به طور مثال در تشخیص سلول‌های سرطانی، نانوذرات به‌وسیله پیونددهنده‌های زیستی به سلول‌های سرطانی متصل می‌شوند و به این ترتیب سلول‌های سرطانی از بافت سالم قابل تشخیص می‌شوند. از طرفی با استفاده از گرمای زیاد ناشی از برانگیختگی نوری نانوذرات، می‌توان بافت سرطانی را تخریب کرد[۵].

در این مقاله نانوذرات در تله‌ی نوری را از نظر انتقال اندازه حرکت زاویه‌ای نور به ذره مورد بررسی قرار می‌دهیم. نانوذرات فلزی به دلیل جذب بالایی که دارند، براحتی با انتقال اندازه حرکت زاویه‌ایِ قطبش دایره‌ای نور لیزر در تله‌ی نوری می‌چرخند. سرعت چرخش به اندازه‌ی ذرات، شکل آنها و توان لیزر بستگی دارد. در اینجا نشان می‌دهیم که سرعت چرخش برای نانو ذرات فلزی بسیار بیشتر از نانومیله‌های فلزی است و به چند کیلوهرتز می‌رسد. چرخش ذرات نانومتری می‌تواند کاربردهای زیادی در نانوسنسورها و میکروکانال‌ها داشته باشد.

## ۲- چیدمان آزمایشگاهی

چیدمان آزمایشگاهی مورد استفاده، شامل یک لیزر (Ti:Saph, Spectra-Physics ۳۹۰۰S) با طول موج ۸۳۰nm و یک میکروسکوپ وارون (Nikon TE ۳۱۰۰) است. نور خروجی لیزر در ابتدا قطبش خطی دارد که بعد از اینکه توسط دو لنز پهن شد، توسط یک قطبش‌گر و یک تیغه‌ی ربع موج، می‌توان قطبش دایره‌ای ایجاد کرد. نور لیزر بعد از بازتاب از دو آینه وارد یک میکروسکوپ شده و توسط یک عدسی شیئی (۶۰x و NA=۰،۷) داخل نمونه کانونی می‌شود. اطلاعات بیشتر در مورد چیدمان آزمایشگاهی را می‌توان در مرجع ۶ یافت. نانوذراتی که در این آزمایش برای تله‌اندازی استفاده می‌شوند، شامل نانو ذرات میله‌ای شکل از جنس نقره با طول‌های مختلف یا نانو ذرات کروی شکل با قطر تقریبی ۴۰۰nm هستند که از شرکت Sigma-Aldrich خریداری شده‌اند. هر دو نوع این ذرات جذب بالایی در طول موج ۸۳۰nm دارند که باعث می‌شود اندازه‌حرکت زاویه‌ای بیشتری به ذرات در تله‌ی نوری منتقل شود. شکل ۱، تصاویر SEM این ذرات را نشان می‌دهد.

آماده سازی نمونه به این صورت است که ابتدا لام و لامل‌های مورد نیاز را با استفاده از محلول TL۱ شسته و



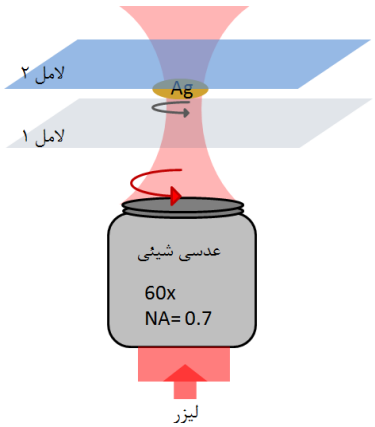

شکل ۱: تصاویر SEM از ذرات مورد بررسی در این مقاله. الف) نانو میله نقره، ب) نانو کره‌های طلا با قطر تقریبی ۴۰۰ نانومتر.

تمیز می‌نماییم. تمیز نمودن شیشه‌ها در این آزمایش،



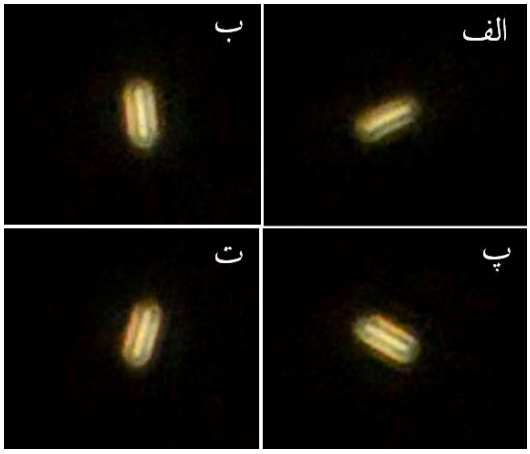
[ Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30 ]

خصوصا برای چرخش نانومیله‌ها اهمیت زیادی دارد. چون تله‌ی ایجاد شده یک تله‌ی دوبعدی است و در نزدیکی سطح لامل انجام می‌شود، تمیز نمودن لامل‌ها کمک می‌کند که آلودگی موجود بر روی سطح شیشه و درنتیجه اصطکاک سطح تا حد خوبی کم شود و چرخش نانو میله‌ها در نزدیکی سطح راحت‌تر صورت گیرد. سپس بین لام و لامل با استفاده از چسب‌های دوطرفه ویژه‌ی میکروسکوپی، فضایی به ابعاد دایره‌ای و ارتفاع $۱۰۰\ \mu m$ بوجود می‌آوریم. سپس نانوذرات محلول در آب را پس از رقیق کردن در ظرف نمونه تزریق می‌کنیم. قابل توجه است که این ذرات چون دارای جذب بالایی در طول موج ۸۳۰nm دارند، تله‌اندازی نوری آنها در سه بعد امکان پذیر نیست. به همین دلیل در این آزمایش تلاش می‌شود که آنها را در دوبعد به تله انداخت. برای این کار ابتدا بعد از اینکه نانو میله‌ی مورد نظر را در داخل نمونه پیدا کردیم، با کمک میزچه‌ی جابه‌جا کننده میکرونی، ذره را به سمت کانون لیزر هدایت می‌کنیم. لیزر نیروی دافعه‌ای در جهت انتشار لیزر به این ذره وارد می‌کند. این کار را چند بار تکرار می‌کنیم تا اینکه ذره به سطح لامل بالایی برسد. به این ترتیب ذره بین سطح شیشه و کانون لیزر به تله می‌افتد. شکل ۲ نحوه انجام این کار را نشان می‌دهد. جهت‌گیری نانو میله قبل از نزدیک شدن به سطح لامل ۲، در راستای انتشار لیزر است، ولی در تله‌ی نوری که در نزدیکی سطح لامل ۲ ایجاد می‌شود، بر اثر فشار تابشی به صورت مماس بر سطح قرار می‌گیرد.




شکل ۲: طرحواره‌ی تله‌اندازی دوبعدی نانوذرات فلزی.

در ابتدای آزمایش ابتدا از قطبش خطی لیزر استفاده می‌کنیم، با قطبش خطی نانو میله‌ی نقره در تله‌ی نوری فقط حرکت افت و خیز کاتوره‌ای بسیار محدودی دارد. اگر قطبش خطی لیزر را بچرخانیم، می‌بینیم که نانومیله همراه با قطبش خطی می‌چرخد. برای چرخش قطبش خطی لیزر کافیست که یک تیغه‌ی نیم موج را در مسیر لیزر، قبل از واردشدن به میکروسکوپ، قرار دهیم. به این ترتیب می‌توانیم جهت‌گیری نانومیله در تله‌ی نوری را تغییر دهیم. از طرفی اگر از یک تیغه‌ی ربع موج استفاده کنیم، یک قطبش دایره‌ای ایجاد کرده‌ایم. به این ترتیب مشاهده می‌کنیم که ذره شروع به چرخش می‌کند و با افزایش توان لیزر سرعت چرخش نانومیله افزایش می‌یابد. بیشترین سرعتی که برای چرخش یک نانو میله اندازه‌گیری کرده‌ایم، در حدود ۶ دور بر ثانیه با توان لیزر ۴۰mW در داخل نمونه است. شکل ۳ تصویر میکروسکوپی میدان تاریک از چرخش یک نانو میله‌ی نقره را در تله‌ی نوری را نشان می‌دهد. در این تصویر جهت چرخش ذره، خلاف حرکت عقربه‌ای ساعت است، که اگر تیغه ربع موج را به اندازه ۹۰ درجه بچرخانیم، جهت چرخش ذرات برعکس می‌شود.




شکل ۳: تصویر میکروسکوپی میدان تاریک از یک نانومیله‌ی نقره‌ی چرخنده در تله‌ی نوری. فاصله‌ی زمانی بین تصاویر الف تا ت کمتر از یک ثانیه است. طول این نانومیله در حدود ۳ میکرون است.

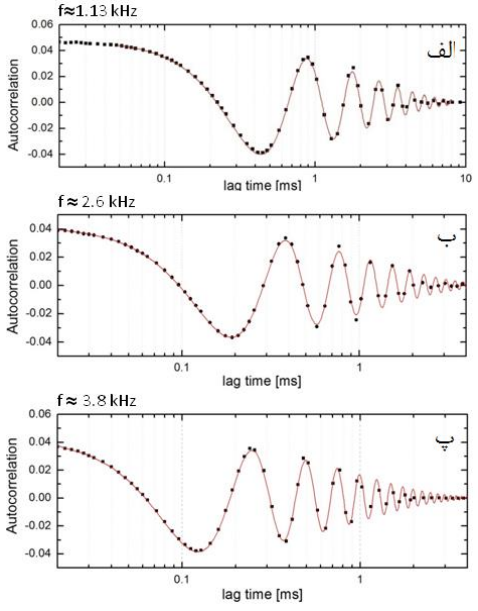
در ادامه، این آزمایش را برای ذرات کروی ۴۰۰nm تکرار می‌کنیم. برای این کار بعد از رقیق کردن ذرات با آب مقطر، از آن نمونه‌ای آماده کرده و مانند نانو میله‌ها آنها را در تله‌ی نوری قرار می‌دهیم. همانطور که تصاویر SEM این ذرات نشان می‌دهد (شکل ۱)، این ذرات به صورت متقارن کروی شکل نیستند و سطح ناصافی دارند. با این وجود، ناصافی این ذرات با استفاده از یک میکروسکوپ نوری قابل تمیزدادن نیست و برای اندازه گیری سرعت چرخش ناچاریم از روش‌های دیگری استفاده کنیم.

برای این کار از یک فیبر نوری که در صفحه تصویر ذره



[ Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30 ]

قرار دارد، استفاده می‌کنیم. فیبر نوری شدت پراکندگی میدان تاریک از ذره را با کمک یک فوتودیود جمع‌آوری کرده و به کامپیوتر منتقل می‌کند. با توجه به اینکه ذرات به طور کاملا نامتقارن هستند، طیف پراکندگی این ذرات در دو راستای عمود برهم اندکی باهم تفاوت دارند. بنابراین استفاده از یک قطبش‌گر قبل از فیبرنوری کمک می‌کند که جهت گیری ذره در داخل تله‌ی نوری را بتوان از هم تمیز داد. در نهایت با محاسبه‌ی نمودار خود همبستگی از شدت نوری که فیبر نوری، در یک بازه‌ی زمانی چند ثانیه، اندازه‌گیری می‌کند [۵]، می‌توانیم سرعت چرخش را تخمین بزنیم. وقتی قطبش لیزر خطی است، نمودار خود همبستگی از شدت نور پراکنده شده از ذره، یک نمودار میرای همگرا به صفر (یک خط صاف) را نشان می‌دهد. ولی وقتی از قطبش دایره‌ای استفاده می‌کنیم، نمودار خودهمبستگی نوسانی و مانند شکل ۴ در می‌آید، که نشان دهنده‌ی چرخش ذره‌ی در تله است [۴]. با برازش بر این داده‌های تجربی می‌توان سرعت چرخش ذره را اندازه‌گیری کرد. اطلاعات بیشتر در مورد تحلیل داده‌ها با استفاده از تابع خودهمبستگی را می‌توان




شکل ۴: نمودار خودهمبستگی از شدت نور تصویر میکروسکوپی میدان تاریک از ذرات ۴۰۰ نانومتری در تله‌ی نوری. توان لیزر به ترتیب الف)۱۶ mW، ب)۲۶ mW ، و پ)۴۶ mW است.

در مرجع ۶ پیدا کرد. شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش توان لیزر از ۱۶mW تا ۴۶mW در داخل نمونه، سرعت چرخش افزایش و از ۱/۱ کیلوهرتز به ۸/۳ کیلو هرتز می‌رسد. باید توجه داشت که این تله‌ی نوری در نزدیکی سطح قرار دارد. بنابراین اصطکاک بین سطح و ذره برای ذرات میله‌ای شکل بزرگتر است که یکی از دلایلی است که ذرات میله‌ای با سرعت کمتری نسبت به ذرات گرد می‌چرخند.

روش دیگری که برای تخمین سرعت چرخش استفاده نمودیم، روش طیف توانی است. در روش طیف توانی که روش رایجی برای اندازه‌گیری سختی تله‌ی نوری است، از یک فوتودیود چهارتایی در صفحه کانون پشتی عدسی جمع‌کننده استفاده می‌کنیم[۴]. نتایج این روش توافق خوبی با روش استفاده از نمودار خودهمبستگی دارد.

## ۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله به صورت تجربی نشان دادیم که چگونه انتقال اندازه حرکت زاویه‌ای نور به ذرات فلزی جاذب باعث جهت گیری و چرخش آنها می‌شود. جهت چرخش وابسته به جهت اندازه‌حرکت زاویه‌ای نور است و سرعت چرخش این ذرات وابسته به اندازه‌ی ذره، شکل آن و توان لیزر است. بیشترین سرعت چرخشی که در این بررسی اندازه گیری شد در حدود چند هرتز برای نانومیله‌ها و چند کیلو هرتز برای نانو ذرات کروی است.

## سپاسگزاری

از دکتر سید نادر ریحانی برای بحث‌های مفید و پیشنهادهای سازنده‌ی ایشان بسیار سپاسگزاریم.

## مراجع

[۱] A. Ashkin, J. m. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, S. Chu, *Observation of the single-beam gradient force optical trap for dielectric particles*. **Opt. Lett,** ۱۱, (۱۹۸٦) ۲۸۸-۲۹۰.

[۲] F. Hajizadeh and S. N. S. Reihani, *Optimized Optical Trapping of gold nanoparticles*, **Opt. Exp**. ۱۸ (۲۰۱۰) ٥٥١_٥٥٩.

[۳] P. M.Hansen, V. K. Bhatia, N. Harrit, and L. Oddershede, *Expanding the optical trapping range of gold nanoparticles anoparticles*, **Nano Lett.** ٥ (۲۰۰٥)

[٤] F. Hajizadeh and S. N. S. Reihani, *Gold Nano-Smolder for Biological Tissue Manipulation*, **IJOP,** ۷ (۲۰۱۳) ٥٥-٦۲

[٥] P. K. Jain, I. H. El-Sayed, and M. A. El-sayed, *Au nanoparticles target cancer*, **Nano Today,** ۲ (۲۰۰۷) ۱۸-۲۹.

[٦] A. Lehmuskero, R. Ogier, T. Gschneidtner, P. Johansson, and M. Käll, *Ultrafast spinning of gold nanoparticles in water using circularly polarized light*, **Nano Lett**. ۱۳ (۲۰۱۳) ۳۱۲۹-۳۱۳٤



[ Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30 ]