وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه
گاوازنگ - زنجان

مطالعه‌ی چرخش ذرات دوشکستی بوسیله‌ی انبرک نوری

پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد

محمود حسین‌زاده

استاد راهنما: دکتر سید نادر سید ریحانی

استاد مشاور: دکتر مهدی حبیبی

مهر ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به مادرم، پدرم و برادر کوچکم مصطفی

قدردانی و تشکر

از خدای بزرگ که نمی‌توان تشکر کرد پس قبل از هر چیز از استاد عزیزم آقای دکتر سید نادر سید ریحانی تشکر می‌کنم که بهترین دوست من در طول دوران تحصیل در دانشگاه تحصیلات تکمیلی بوده و دلی بزرگ، قلبی دلسوز، زبانی نرم، علمی فراوان و تواضعی فراوان‌تر دارد. از آقای دکتر حبیبی هم که در طول این مدت از هیچ کمکی به بنده دریغ نکردند بسیار ممنونم. همچنین از خانم حاجی‌زاده و آقای سیدمحمدرضا طاهری که در طول این پروژه صمیمانه مرا یاری کردند کمال تشکر را دارم. از تمام بچه‌های گروه اپتیک و ماده چگال مخصوصاً آقایان رجبی، صمدی، چهارسوقی، محمودی، مصطفوی امجد، چراغیان، اخلاقی، ناصری، فرهنگی و جوادی و خانم‌ها مرتضوی، کریمی و زینلی که گاه و بیگاه مزاحمشان می‌شدم و بی هیچ چشمداشتی یاریم می‌کردند صمیمانه متشکرم. از تمامی کارمندان مرکز به‌ویژه آقای طوماری که اگر نبود وسایلی که برای کار من ساختند این پروژه تحقق نمی‌یافت سپاسگزارم. امیدوارم خداوند بر توفیقات کسانی که نامبردم و کسانی که اسمشان از قلم افتاده و حقی بر گردن من دارند بیفزاید و آنها را جلال و بزرگی دهد. از پروفسور ثبوتی نیز به‌خاطر فراهم آوردن چنین محیط آرامی قدردانی می‌کنم و امیدوارم خداوند بر طول عمر ایشان بیفزاید.

ای کاش می‌توانستم زحمات مادرم را که در طول این مدت هر روز یا یک روز در میان با من تماس می‌گرفت و باعث دلگرمی من می‌شد جبران کنم. دعا می‌کنم خداوند او را حفظ کند.

محمود حسین‌زاده

مهرماه ۱۳۹۰

چکیده

در این پایان‌نامه چرخش ذرات دوشکستی با اندازه‌ی میکرونی واتریت به دام افتاده توسط انبرک نوری بررسی می‌شود. انبرک نوری یک باریکه‌ی لیزر است که توسط یک شیئی با دهانه‌ی عددی بالا کانونی شده است. باریکه‌ی نور می‌تواند تکانه‌ی زاویه‌ای حمل کند که از انتقال این تکانه‌ی زاویه‌ای از نور به ذره‌ی میکرونی، گشتاور زاویه‌ای به ذره اعمال شده و ذره می‌تواند بچرخد.

این پایان نامه در دو بخش کلی نوشته شده است. در بخش اول تأثیر عوامل زیر بر بسامد چرخش ذره به‌طور تجربی بررسی می‌شود

۱– افزایش عمق تله اندازی

۲– افزایش توان لیزر

۳– جهت‌گیری ذره‌ی نامتقارن در تله

۴– تغییر روغن غوطه‌وری میکروسکوپ

۵– افزودن نانوذرات طلا به ذرات دوشکستی واتریت

در بخش دوم، از ذره‌ی چرخنده به‌عنوان مخلوط کننده‌ی میکرونی در مبحث میکروشاره‌ها استفاده می‌شود، به این ترتیب که دو سیال آب و جوهر در یک میکروکانال T شکل به‌جریان واداشته می‌شوند که با چرخاندن ذره در مرز مشترک نمایه‌ی آب و جوهر فرآیند مخلوط شدن تسریع می‌شود.

واژگان کلیدی : دوشکستی، انبرک نوری، روغن غوطه‌وری، مخلوط کننده‌ی میکرونی، میکروشاره، میکروکانال

فهرست

چکیده . . . . . پنج

مقدمه . . . . . ده

۱ انبرک نوری

۱.۱ انواع انبرک نوری ۴

۲ چرخش ذرات میکرونی

۱.۲ کاربردهای چرخش ذره ٦

۲.۲ چه ذراتی را می‌توان توسط انبرک نوری چرخاند ۷

۳.۲ انتقال تکانه‌ی زاویه‌ای به ذره‌ی دو شکستی در تله‌ی انبرک نوری ۱۰

۴.۲ چرخش ذره‌ی دو شکستی در میدان با قطبش دایروی ۱۱

۵.۲ چرخش ذره‌ی دو شکستی در میدان با قطبش خطی ۱۲

٦.۲ محاسبه‌ی گشتاور اپتیکیِ ذره‌ی چرخنده‌ی کروی ۱۳

۷.۲ گشتاور اپتیکی و فرکانس زاویه‌ای چرخش ذره‌ی دوشکستی ۱۶
۸.۲ انتقال تکانه‌ی زاویه‌ای به ذرات جاذب نور ۲۰
۹.۲ چرخش ذرات جاذب توسط باریکه‌های لاگرگوس ۲۲
۱۰.۲ چرخش ذرات نامتقارن ۲۵
۱.۱۰.۲ چرخش ذرات میله‌ای شکل ۲۶
۱۱.۲ چرخش ذرات بوسیله‌ی شکاف چرخان ۲۹
۱۲.۲ چرخش ذرات بوسیله‌ی تیغه‌ی نیم موج چرخان ۳۲
۱۳.۲ چرخنده‌ی نوری به‌عنوان میکروپمپ ۳۲

۳ ذره‌ی دوشکستیِ واتریت کروی

۱.۳ خصوصیات واتریت ۳۵
۱.۱.۳ خصوصیات ساختاری ۳۶
۲.۱.۳ خصوصیات اپتیکی ۳۸
۲.۳ روش ساخت واتریت کروی ۴۳
۳.۳ روش ساخت واتریت مکعبی ۴۴
۴.۳ اندازه‌ی ذرات کروی واتریت ۴۴
۵.۳ پایداری ذره‌ی واتریت ۴۶
۱.۵.۳ اثر افزودن نانوله‌ی کربنی بر پایداری ذره‌ی واتریت ۴۷
۲.۵.۳ اثر حلال بر پایداری ذره‌ی واتریت ۴۸

۳.۵.۳ پایداری ذره‌ی واتریت کروی با گذر زمان ۴۸
۴.۵.۳ اثر دما بر پایداری ذرات واتریت ۵۰

۴ اندازه‌گیری سرعت چرخش

۱.۴ فتودیود، ابزاری برای اندازه‌گیری فرکانس چرخش ذره ۵۳
۱.۱.۴ ناتوانی فتودیود از آشکارسازی چرخش اسپینی ذرات کروی ۵۵
۲.۴ ابیراهی ۵۷
۱.۲.۴ چرخش ذره‌ی دوشکستی در انبرک نوری با ابیراهی کروی ۵۹
۳.۴ تأثیر افزایش عمق ذره در نمونه بر سرعت چرخش ذره ۶۰
۱.۳.۴ اثر مرزی ۶۲
۴.۴ تأثیر افزایش توان لیزر بر سرعت چرخش ذره ۶۳
۵.۴ تأثیر اندازه‌ی ذره بر سرعت چرخش ذره ۶۵
۶.۴ ثبات فرکانس چرخش با زمان ۶۷
۷.۴ مقایسه‌ی کیفی فتودیود و سی‌سی‌دی (CCD) ۶۸
۸.۴ مقایسه‌ی کمی فتودیود و سی‌سی‌دی (CCD) ۶۹
۹.۴ تأثیر جهت‌گیری ذراتِ نامتقارن در تله بر فرکانس چرخش آنها ۷۳
۱۰.۴ اندازه‌گیری بسامد چرخش به‌ازای تغییر روغن غوطه‌وری میکروسکوپ ۷۴
۱.۱۰.۴ نتایج تجربی ۸۰
۱۱.۴ چرخش ذره‌ی میکرونی در داخل میکروکانال به‌عنوان مخلوط کننده‌ی میکرونی ۸۳

۱.۱۱.۴ مبانی نظری مخلوط شدن برپایه‌ی پخش مولکولی ۸۴
۲.۱۱.۴ ساخت کانال میکرونی ۸۶
۳.۱۱.۴ نتایج تجربی ۸۹
۱۲.۴ تأثیر افزودن نانوذره‌ی طلا به ذره‌ی واتریت در فرکانس چرخش این ذره ۹۰
۱.۱۲.۴ نتیجه‌ی تجربی ۹۱
پیوست الف: تئوری انتقال تکانه‌ی زاویه‌ای از نور به ماده‌ی دوشکستی ۹۲
پیوست ب ۹۷
پیوست ج ۹۹
پیوست د ۱۰۱
پیوست ه ۱۰۶
پیوست و ۱۰۸
مراجع ۱۱۰

مقدمه

درسال ۱۹۷۰ اشکین [۱] نشان داد که ذرات می‌توانند برخلاف نیروی جاذبه در ناحیه‌ی مرکزیِ یک باریکه‌ی لیزر با تقارن محوری شناور شوند که بعداً در مقاله‌ی خود عبارت شناوری اپتیکی را برای آن استفاده کرد. ۱۵ سال بعد، اشکین از اصل شناوری استفاده کرد تا نشان دهد که ذرات می‌توانند در ناحیه‌ای از یک لیزر (به‌شدت کانونی شده) که کمترین پهنا را دارد به تله بیافتند. پس از آن تلاش‌های علمی زیادی به مطالعه و به‌کارگیری شناوری و تله‌اندازی اپتیکی اختصاص یافت[۱]. این روش به عنوان یک تکنیک قدرتمند به نام انبرک نوری شناخته می‌شود.

انبرک نوری در حال حاضر یکی از قوی ترین ابزارها برای نگه‌داری و کنترل ذرات کوچک بدون دستکاری [۲] مکانیکی است. این ابزار برای محدوده‌ی وسیعی از ذرات (با اندازه‌ی میکرون و کمتر از آن) کاربرد دارد. انبرک نوری یک باریکه‌ی لیزر است که توسط یک شیئی با دهانه‌ی عددی بالا کانونی شده، طوری که نقطه‌ی کانونی، اندازه‌ای از مرتبه‌ی میکرون دارد[۲].

این ابزار بر پایه‌ی نیروی گرادیانی است. برای ذرات با ضریب شکست بالاتر از محیط اطراف، باریکه‌ی لیزر، ذره‌ی تله‌شده را در ناحیه‌ای که بالاترین شدت را دارد جذب می‌کند.

امروزه تله‌های نوری به خاطر توانایی دستکاری ذرات میکروسکوپی به ابزاری مهم در علوم فیزیک و بیولوژی تبدیل شده‌اند. انواع مختلفی از تله‌های نوری تک‌باریکه، دوباریکه و چندگانه برای دستکاری ذرات خنثی، ویروس‌ها و باکتری‌ها، سلول‌ها، کروموزوم‌ها و DNA، موتورهای بیولوژیکی و پروتئینی به‌کار می‌روند. پیشرفت‌های زیادی نیز در زمینه‌ی اعمال گشتاور به ذره‌های به تله افتاده صورت گرفته‌است. تکانه‌ی زاویه‌ای مداری یا اسپینیِ نور می‌تواند گشتاوری به ذره اعمال کند. برای این منظور یا از باریکه‌هایی که تکانه‌ی زاویه‌ای خوش‌تعریفی دارند، مانند باریکه‌های لاگرگوس [۳] و نیز باریکه‌هایی که تکینگی‌های فازی [۴] دارند نظیر باریکه‌های بسلی استفاده می‌شود و یا از باریکه‌ی گوسی با قطبش دایروی بهره می‌گیرند. هر فوتون از این باریکه دارای

[۱] Ashkin

[۲] manipulation

[۳] Laguerre-Gaussian beam

[۴] phase singularities

تکانه‌ی زاویه‌ای $\pm\hbar$ است. باریکه‌ای با توان P معادل است با شار تکانه‌ی زاویه‌ای $\pm P/\omega$. یک باریکه با قطبش بیضوی دارای شار تکانه‌ی زاویه‌ای $L_z = \sigma_z P/\omega$ است که σ_z برای قطبش‌های خطی و دایروی به ترتیب ۰ و ± 1 است و برای قطبش بیضوی، مقداری کسری بین این دو مقدار دارد. این نور قطبیده می‌تواند ذرات با جذب جزئی را بچرخاند ولی برای ایجاد سرعت‌های چرخش بالا از ذرات دوشکستی استفاده می‌کنند[۳].

فصل اول این پایان‌نامه به معرفی انبرک نوری اختصاص دارد. در فصل دوم، مبانی نظری چرخش و معمول‌ترین روش‌هایی که برای چرخاندن ذرات میکرونی بوسیله‌ی نور مورد استفاده قرار می‌گیرند گنجانده شده است. در فصل سوم که بیشتر به علم شیمی مربوط می‌شود، ذره‌ی دوشکستی واتریت که ما روی چرخش آن کار می‌کنیم از لحاظ ساختاری و اپتیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد و در فصل چهارم که آخرین و مهم‌ترین فصل این پایان نامه است، نتیجه‌ی آزمایش‌ها بر روی چرخش ذرات میکرونی واتریت آمده است. امید است که این پایان‌نامه در آینده مورد استفاده دانشجویانی که روی چرخش ذرات میکرونی و زیرمیکرونی تحقیق می‌کنند واقع شود.

فصل اول

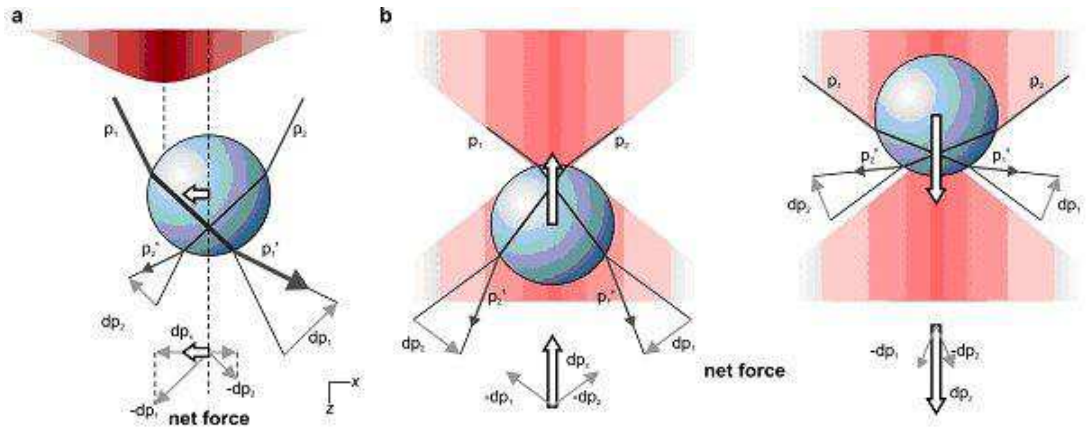
انبرک نوری

انبرک نوری در اصل توسط اشکین در اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰ توسعه پیدا کرد و به وسیله‌ای برای بررسی برهم‌کنش بین نور و ماده در ابعاد میکرون تبدیل شد[۵]. این تکنیک برپایه‌ی این قانون استوار است که اجسام دی‌الکتریکی که در معرض نور قرار دارند توسط نیروی گرادیان تابشی، به ناحیه‌ای که بیشینه‌ی شدت را دارا است کشیده می‌شوند. پس با یک نور به‌شدت کانونی شده می‌توان این اجسام را در سه بعد به یک نقطه محدود کرد.

در شکل ۱—۱ با کانونی کردن یک باریکه‌ی لیزر گوسی، تله اندازی یک ذره‌ی دی‌الکتریک شفاف با ضریب شکست بالاتر از محیط اطرافش نشان داده شده است. در شکل سمت راست می‌بینیم که ذره کمی بالاتر از کانون قرار دارد، اما چنانچه به باریکه‌ی لیزر قبل و بعد از ذره دقت کنیم، متوجه می‌شویم که پرتوها بعد از ذره نسبت به پرتوها قبل از ذره، واگراتر شده‌اند. یعنی ذره یک تکانه‌ی خالص رو به بالا به باریکه‌ی لیزر وارد کرده که عکس‌العمل آن این است که باریکه‌ی لیزر یک تکانه‌ی خالص رو به پایین به ذره وارد می‌کند و ذره را به کانون لیزر می‌کشاند. در شکل وسطی که ذره کمی پایین‌تر از کانون قرار دارد، با استدلالی مشابه اما معکوس ذره به سمت کانون کشیده می‌شود.

در شکل سمت چپ (a—۱—۱) می‌بینیم که ذره کمی در سمت راست محور پروفایل گوسی لیزر قرار دارد. اگر به پرتوهای قبل و بعد از ذره دقت کنیم قبل از ذره، پرتوها هیچ تکانه‌ی خالصی به سمت چپ یا راست ندارند

اما چون شدت باریکه گوسی در مرکز بیشتر از اطراف است، بعد از ذره پرتوها یک تکانه‌ی خالص به سمت راست دارند که طبق قانون سوم نیوتن یک تکانه‌ی خالص از باریکه به ذره به سمت چپ وارد می‌شود و ذره را به محور پروفایل گوسی می‌کشاند. علت اینکه در شکل ۱ — ۱ تنها پرتوهای کناری عدسی نشان داده می‌شود، این است که این پرتوها بیشتر می‌شکنند و چون دهانه‌ی عددی بالاتری دارند سهم بیشتری در نیروی تله دارند.

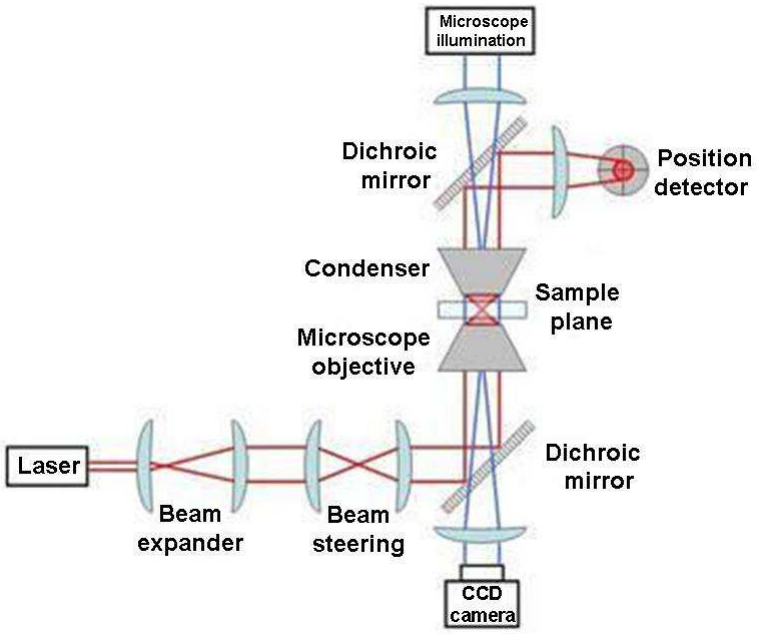


شکل ۱ — ۱ منشاء نیروی گرادیانی a) نیروی عرضی b) نیروی طولی [۴]

با این روش می‌توان اجسام با ابعاد ۵ نانومتر تا ۱۰ میکرون را تله‌اندازی کرد. به‌علاوه اینکه با یک تعدیل کننده‌ی فضایی نور (SLM) می‌توان یک باریکه‌ی لیزر را به چندین باریکه تبدیل کرد و به‌طور هم‌زمان چندین تله داشت که به آن انبرک نوری تمام نگار[۱] می‌گویند. از انبرک نوری برای بررسی تکانه‌ی زاویه‌ای نور نیز استفاده‌ی وسیعی می‌شود. می‌دانیم که نور، بسته به حالت قطبش و یا ساختار فازیِ خود می‌تواند (به‌ترتیب) تکانه‌ی زاویه‌ای اسپینی و مداری حمل کند. وقتی از یک باریکه‌ی قطبیده‌ی دایروی برای تله‌اندازی یک ذره‌ی دوشکستی با ابعاد میکرون استفاده می‌شود، در نتیجه‌ی انتقال تکانه‌ی زاویه‌ای از نور به ذره، ذره می‌تواند با سرعتی بالغ بر چندصد هرتز بچرخد. اخیراً از انبرک نوری هلوگرافیک برای انتقال تکانه‌ی زاویه‌ای مداری به ذرات استفاده شده‌است که باعث جابجایی تعدادی ذره در مسیر یک حلقه، در محیط سیال می‌شود. این ذرات چرخنده، کاربردهای فراوانی دارند [۵].

[۱] Holographic optical tweezers

در شکل ۱ — ۲ چیدمان انبرک نوری دانشگاه تحصیلات تکمیلی به‌صورت شماتیک ارائه شده است. لیزر استفاده شده در این دستگاه، لیزر پیوسته‌ی حالت جامد Nd-YAG با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و مد عرضی گوسی است که در ناحیه‌ی فروسرخ قرار دارد و توان آن تا ۲ وات قابل افزایش می‌باشد. ما از یک میکروسکوپ از نوع الیمپوس $IX - ۷۱$ استفاده می‌کنیم. باریکه‌ی لیزر از درگاه میکروسکوپ وارد آن می‌شود و بوسیله‌ی یک آینه‌ی دورنگی به طرف شیئی هدایت می‌شود. عدسی شیئی باریکه‌ی لیزر را با دهانه‌ی عددی بالا روی نمونه کانونی می‌کند و ذرات در کانون تله اندازی می‌شوند. پرتوهای پراشیده به جلو از ذره و اطراف ذره، بوسیله‌ی چگالنده جمع می‌شوند و از طریق یک آینه‌ی دورنگی به سمت فتودیود هدایت می‌شوند. با فتودیود می‌توان جابه‌جایی و یا چرخش ذره را ثبت کرد. نور لامپ میکروسکوپ نیز که از طریق چگالنده روی نمونه کانونی می‌شود توسط شیئی جمع شده و به یک دوربین هدایت می‌شود و ما می‌توانیم تصویر ذره را در صفحه نمایش یک رایانه تماشا کنیم.



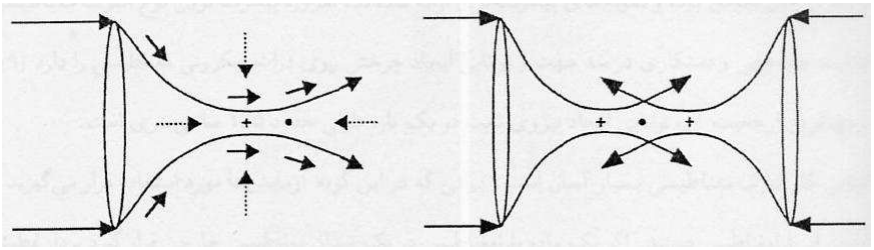
شکل ۱ — ۲شمای انبرک نوری [٦]

انبرک نوری عموماً برای دستکاری ذرات میکروسکوپی شفاف با ضریب شکست بالاتر از محیط اطراف

استفاده می‌شود. البته اگر از باریکه‌های دونات[۲] استفاده شود، می‌توان ذراتِ با ضریب شکست پایین‌تر از محیط اطراف را هم به‌طور سه بعدی تله‌اندازی کرد. ذرات فلزی را هم می‌توان تله‌اندازیِ سه بعدی کرد به‌شرطی که این ذرات آنقدر کوچک باشند که مانند دوقطبی رفتار کنند چراکه ذرات فلزی جذب بالایی دارند و نیروی فشار تابشی، آنها را از تله خارج می‌کند[۷].

۱.۱ انواع انبرک نوری

انبرک نوری به‌طور کلی در دو آرایش ارائه شده است. یکی انبرک نوری تک باریکه و دیگری انبرک نوری دوباریکه‌ای. مبانی روش اول به‌طور خلاصه توضیح داده شده است. در روش دوم با توجه به اینکه از دو باریکه‌ی هم‌راستا با جهت‌های انتشار مخالف هم استفاده می‌شود (شکل ۱—۳)، نیروی پراکندگی وارد بر ذره از طرف دو باریکه همدیگر را حذف می‌کنند و به این ترتیب نیروهای گرادیانی به‌راحتی ذره را به تله خواهند انداخت و این یکی از برترین مزایای نوع دوم است. تنها نقطه ضعف روش دوم، دقت لازم برای هم‌راستا کردن باریکه‌های لیزر است. از این بابت کار با روش اول بسیار آسان‌تر است. در روش اول برای غلبه‌ی نیروهای گرادیانی بر نیروی پراکندگی لازم است باریکه با زاویه‌ی فضایی بالا کانونی شود.



شکل ۱—۳شمای تله‌های تک باریکه‌ای و دو باریکه‌ای [۸]

[۲] doughnut-shaped beams

فصل دوم

چرخش ذرات میکرونی

گشتاور اپتیکیِ نور قطبیده‌ی بیضوی در سال ۱۹۰۰ توسط سادوسکی[۱] محاسبه شد که چون این گشتاور بسیار کوچک بود عملاً تا زمان بث[۲] یعنی تا سال ۱۹۳۶ آشکارسازی نشد. آزمایش بث بسیار مشکل و پیچیده بود[۷].

بعد از آن سانتاماتو[۳] نشان داد که نور به مولکول‌های بلور مایع[۴]، چرخش القا می‌کند. چانگ و لی[۵] گشتاور اپتیکی وارد بر ذرات اپتیکیِ شناوری که جذب جزئی داشتند را محاسبه کردند. این تکانه و گشتاور به‌قدری کوچک بود که مشاهده‌ی تأثیرِ آن بر محیط اطراف در عمل بسیار مشکل بود تا اینکه پس از اختراع لیزر در دهه‌ی ۱۹۷۰، اشکین و دزیدزیک[۶] چرخش ذرات شناور در هوا را مشاهده کردند[۹].

در ابتدای قرن بیستم بود که پویینتینگ پیشنهاد داد که تابش الکترومغناطیسی با قطبش دایروی تکانه‌ی زاویه‌ای حمل می‌کند. از تئوری کوانتوم، تکانه‌ی خطی نور برابر $\hbar k = \hbar\omega/c$ به ازای هر فوتون می‌باشد. ω فرکانس زاویه‌ای نور و c سرعت آن است. تکانه‌ی زاویه‌ای وابسته به قطبش موج به نام تکانه‌ی زاویه‌ای اسپینی شناخته می‌شود. نور با قطبش دایروی به ازای هر فوتون تکانه‌ی زاویه‌ای $\hbar+$ و $\hbar-$ حمل می‌کند. خلاصه اینکه

[۱] sadowsky

[۲] Beth

[۳] Santamato

[۴] liquid crystal

[۵] Chang and Lee

[۶] Ashkin and Dziedzik

نور دارای تکانه‌ی زاویه‌ای مستقل از بسامد می‌باشد و تکانه‌ی خطی آن به بسامد نور وابسته است. بث[۷] اولین بار در آزمایش‌های خود پیشنهاد پوینتینگ[۸] را به کار برد و گشتاور وارد بر یک تیغه‌ی نیم‌موج دوشکستی را در عبور موج نور با قطبش دایروی از آن اندازه گرفت و نشان داد که قادر است جهت تکانه را عوض کند به‌طوری که ذره از چپ به راست یا بالعکس بچرخد[۱۰]. با استفاده از پایستگی تکانه زاویه‌ای بین تیغه و نور، هر فوتون تکانه‌ی زاویه‌ای $2\hbar$ به تیغه وارد می‌کرد.

۱.۲ کاربردهای چرخش ذره

از زمان ساخت انبرک نوری تا کنون پیشرفت‌های اندکی در زمینه‌ی ذراتی که برای تله اندازی استفاده می‌شوند وجود داشته است. ذرات پلی استایرن و سیلیکایی که در آزمایشات اولیه استفاده شدند برای اندازه گیری دقیق نیرو بسیار مناسب بودند. البته هنوز هم امکان پیشرفت‌های بیشتر از قبیل انتخاب ذره‌ای که باعث افزایش قدرت تله می‌شود وجود دارد. مثلاً به‌جای استفاده از ذرات با ضریب شکست بالا، می‌توان از ذرات با پوشش ضد بازتاب برای افزایش نیروی تله استفاده کرد. پیشرفت دیگری که در این زمینه حاصل شده، معرفی یک درجه کنترل اضافی برای ذره است. با انتخاب ذرات با خاصیت دوشکستی بالا[۹] می‌توان به این هدف نائل شد به این ترتیب که تکانه‌ی زاویه‌ای اسپینی از باریکه‌ی نوری با قطبش دایروی می‌تواند به این ذره منتقل شود. یکی از این ذرات دوشکستی، واتریت ($CaCO_3$) است. کاربردهای مفید و جالبی برای چرخش ذرات واتریت در تله‌ی نوری وجود دارد. خاصیت دوشکستی بالای این ذرات منجر به اعمال گشتاور به آنها می‌شود که این گشتاور به‌طریق اپتیکی قابل اندازه گیری است. از دیگر کاربردهای چرخش ذره می‌توان به موارد زیر اشاره کرد[۱۱]:

۱— طیف نمایی گشتاوری برای تک مولکول‌ها[۱۰][۱۲، ۱۳، ۱۴].

۲— ساخت موتورهای مولکولی [۱۵، ۱۶].

۳— استفاده از ذرات واتریت به‌عنوان میکروپمپ، با استفاده از خاصیت ایجاد جریان در اطراف ذره‌ی درحال

[۷] Bath

[۸] poynting

[۹] Highly birefringent particle

[۱۰] torque spectroscopy of single molecules

چرخش در سیال [۱۷].

۴– ساخت آشکارساز[۱۱] برای اندازه‌گیری خصوصیات مایع اطراف ذره با استفاده از ترکیب ذره با گشتاور وارد بر آن [۱۸، ۱۹، ۲۰].

۵– استفاده به عنوان دستگیره‌ای برای دستکاری میکروسکوپی اشیائی از قبیل سلول‌ها (که چرخاندن و در یک صف قرار دادن آنها دشوار است) [۲۱].

۶– نگهداری ذرات دیگر در جهت‌های خاص با توجه به جهت‌گیری قابل کنترل ذرات واتریت که این کار برای میکروسکوپی نیروی اتمی و دیگر انواع میکروسکوپی بسیار کاربرد دارد.

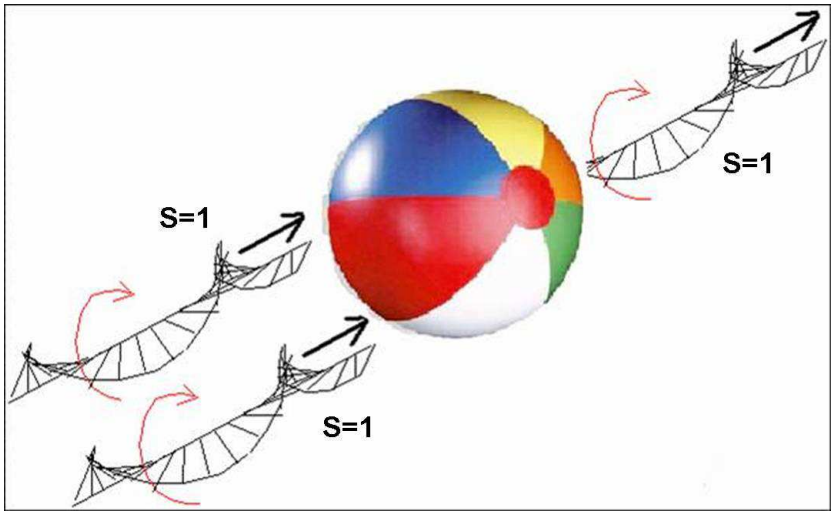
۷– ساخت میکروهمزن[۱۲] و بسیاری از کاربردهای دیگر

۲.۲ چه ذراتی را می‌توان توسط انبرک نوری چرخاند

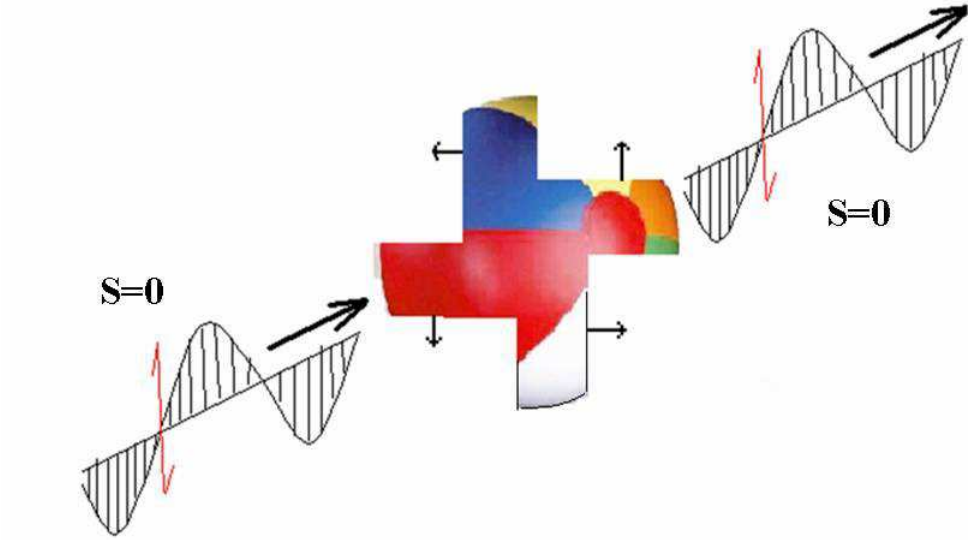
همانطور که می‌دانیم نور می‌تواند تکانه‌ی زاویه‌ای را حمل کند و یا انتقال دهد. در سال‌های اخیر این موضوع در زمینه‌ی چرخش میکروذرات در انبرک نوری استفاده‌ی گسترده‌ای داشته است. ذراتی که برای این موضوع استفاده می‌شود یا باید جذب داشته باشند (شکل ۲–۱) یا اینکه به شکل خاصی (مثلاً شکل پره‌ی پنکه) طراحی شده باشند (شکل ۲–۲) و یا دوشکستی باشند (شکل ۲–۳). ذره‌ی جاذب با جذب فوتون‌های نور فرودی می‌تواند بچرخد. اگر تکانه‌ی زاویه‌ای اسپینی برای نور قطبیده‌ی دایروی برابر ۱ باشد طبق اصل پایستگی تکانه‌ی زاویه‌ای اسپینی، قبل و بعد از ذره، می‌بایست مقداری تکانه‌ی زاویه‌ای به ذره منتقل شده باشد. اگر شکل ذره بسیار نامتقارن باشد حتی با نور قطبیده‌ی خطی نیز می‌چرخد زیرا نیروی پراکندگی ناشی از پرتوهای بازتابی، یک تکانه‌ی خالص در جهت چرخش ذره ایجاد می‌کند. ذره‌ی دوشکستی مانند تیغه‌ی تأخیرانداز عمل می‌کند. در این شکل ذره‌ی دوشکستی مانند تیغه‌ی ربع‌موج عمل می‌کند و نور قطبیده‌ی دایروی را به نور قطبیده‌ی خطی (با اسپین صفر) تبدیل می‌کند. طبق اصل پایستگی تکانه‌ی زاویه‌ای اسپینی، قبل و بعد از ذره، می‌بایست مقداری تکانه‌ی زاویه‌ای به ذره‌ی دوشکستی منتقل شود. []

[۱۱] sensor

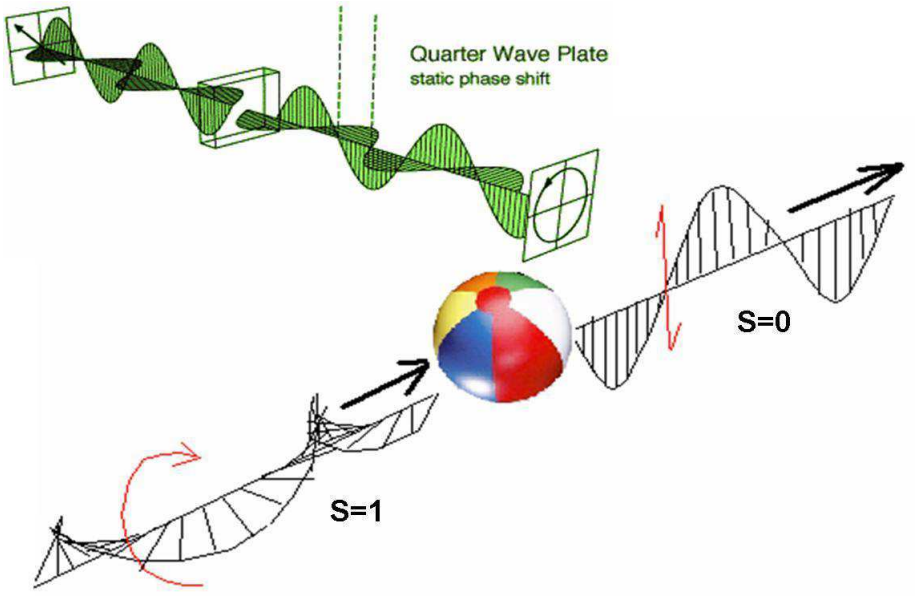
[۱۲] micro mixer



شکل ۲—۱: چرخش ذرات جاذب با نور قطبیده‌ی دایروی



شکل ۲—۲: چرخش ذرات بسیار نامتقارن با نور قطبیده‌ی خطی



شکل ۲—۳: چرخش ذرات دوشکستی با نور قطبیده‌ی دایروی

چرخش ذره به قطبش نور فرودی نیز وابسته است. اگر ذره نامتقارن باشد، می‌توان از نور قطبیده‌ی خطی برای چرخاندن آن استفاده کرد. در مورد ذره‌ی جاذب و ذره‌ی دوشکستی از نور قطبیده‌ی بیضوی استفاده می‌کنند.

تکانه‌ی زاویه‌ای می‌تواند از باریکه‌ای که قطبیده‌ی بیضوی است و یا باریکه‌ای که ساختار فازی پیچشی[۱۳] دارد، به ذره‌ای میکرونی که جذب دارد منتقل شود اما در چنین مواردی نمی‌توان از توان بالا استفاده کرد، زیرا گرمای ناخواسته‌ای که تولید می‌شود و فشار تابشی‌ای که در راستای محور، ذره را از تله خارج می‌کند سرعت چرخش را کاهش می‌دهد. اما با استفاده از ذرات دوشکستیِ شفاف می‌توان بر این مشکل غلبه کرد. این ذرات میکرونی می‌توانند در تله اپتیکیِ سه بعدی در توان‌های خیلی بالا نگه داشته شوند، بدون اینکه گرم شوند. جهت‌گیری این ذرات نیز به قطبش باریکه وابسته است و اگر قطبش بچرخد (مثلاً با قرار دادن یک تیغه‌ی $\lambda/2$ سر راه باریکه و چرخاندن تیغه می‌توان این کار را انجام داد) این ذرات نیز می‌چرخند که با این روش سرعت‌های بیشتر از Hz ۳۵۰ برای ذره‌ی دوشکستیِ کلسیت مشاهده شده است [۲۲].

[۱۳] helical phase structure