



شبهه سازی انتشار امواج الکترومغناطیسی در انبرک نوری به روش FDTD و محاسبه نیروی تله نوری

پایان نامه کارشناسی ارشد
ابراهیم دستجردی

استاد راهنما: دکتر سید نادر سید ریحانی
استاد مشاور: دکتر میرفائز میری

شهریور ۱۳۸۸

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به همسر صبور و دختر عزیزم

قدردانی و تشکر

قبل از هر چیز لازم می‌دانم از مسئولین و در رأس آنها دکتر ثبوتی به خاطر ایجاد محیط آرام و صمیمی دانشگاه تقدیر و تشکر نمایم. از اساتید راهنما و مشاور پایان‌نامه، جناب آقایان دکتر سیدریحانی و دکتر میری تشکر ویژه می‌نمایم. از اساتید گرامی دکتر محمدرفیعی، دکتر فضلی و دکتر رسولی که دروس الکترو دینامیک و اپتیک را نزد ایشان آموخته‌ام و بدون شک این آموخته‌ها در این پایان‌نامه بکار گرفته شده، سپاسگذارم. از همه‌ی دوستانی که مرا در این راه یاری نمودند، بویژه آقایان ابراهیم مددی و مجتبی چراغیان به خاطر بحث‌های مفید و تهیه‌ی برخی مقالات مورد نیاز و آقای یاسر رجبی که تایپ قسمتی از پایان‌نامه را به عهده گرفتند و آقایان احسان بوالحسنی، سید محمد رضا طاهری و علی اکبر آهنگری که در واپسین روزهای تحصیلات مرا در محفل گرم خود پذیرا بودند، تشکر می‌نمایم. از آقایان دکتر خالصی فرد و محمدخانی به خاطر فراهم نمودن رفاه خانواده‌ام در دو سال گذشته تقدیر و تشکر می‌نمایم. از همسر صبورم به خاطر تحمل سختیها و مشقتهاهای فراوان در این مدت و دختر عزیزم که مایه‌ی دلگرمی و امیدواری و زداینده‌ی خستگی‌هایم بود، سپاسگذارم. پیشاپیش از اعضای هیأت داوران به خاطر قبول زحمت داوری پایان‌نامه تقدیر و تشکر می‌نمایم.

چکیده

انبرک نوری با کانونی کردن نور لیزر توسط یک عدسی شیئی با دهانه‌ی عددی بالا، می‌تواند ذرات اطراف کانون را به تله بیاندازد. این ابزار کاربرد گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف علمی از قبیل فیزیک، شیمی و زیست‌شناسی یافته است. لذا بررسی‌های نظری و تجربی، جهت بهبود عملکرد آن از اهمیت بالایی برخوردار است. شبیه‌سازی انبرک نوری می‌تواند ضمن تأیید نتایج تجربی حاضر، نتایج آزمایش‌های احتمالی را پیش‌بینی نماید. تفاضلات متناهی در حوزه زمان (FDTD) روشی برای حل مسائل دارای معادلات دیفرانسیل زمانی و مکانی همزمان مانند معادلات ماکسول بوده و با انعطافی که دارد، کاربرد وسیعی در مسائل دقیق مهندسی الکترومغناطیس یافته است. برای مطالعه‌ی پراکندگی، دو فرمول‌بندی مرسوم FDTD ارائه شده است: میدان پراکندگی خالص و میدان کل-میدان پراکندگی. در فرمول‌بندی اول، برای میدان فرودی معین، میدان‌های پراکندگی از طریق محاسبه بدست می‌آیند. میدان کل از مجموع میدان پراکندگی (حاصل از محاسبه) و میدان فرودی قابل تعیین است. در فرمول‌بندی دوم، فضا به دو ناحیه‌ی میدان پراکندگی و میدان کل تقسیم شده و این میدان‌ها در نواحی مربوط با محاسبه بدست می‌آیند.

در این پایان‌نامه، از روش FDTD با فرمول‌بندی میدان پراکندگی خالص، جهت محاسبه‌ی مقادیر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در داخل و خارج یک ذره‌ی دی‌الکتریک کروی نزدیک پرتولیزر کانونی، استفاده می‌شود. سپس نیروی تابشی وارد بر ذره، با استفاده از تانسور تنش ماکسول بدست می‌آید. نشان داده می‌شود فرمول‌بندی میدان پراکندگی خالص، برای مسائلی که نیاز به مقادیر میدان کل در فضا دارند (مانند انبرک نوری)، مفید نبوده و بهتر است از فرمول‌بندی میدان کل-میدان پراکندگی در این گونه مسائل استفاده شود.

فهرست

چکیده	پنج
مقدمه	یازده

۱ انبرک نوری

۱.۱	تاریخچه فشار تابشی و انبرک نوری	۱
۲.۱	توصیف نظری انبرک نوری	۷
۱.۲.۱	حد رایلی	۸
۲.۲.۱	حد اپتیک هندسی	۱۰
۳.۲.۱	رژیم می	۱۲
۴.۲.۱	تانسور تنش ماکسول و نیروی الکترومغناطیسی	۱۵
۵.۲.۱	روشهای دیگر محاسبه‌ی نیروی تله‌ی نوری	۱۷
۱۷	استفاده از فرمول نیروی لورنتز	۱۷
۱۸	استفاده از گرادیان انرژی الکترومغناطیسی	۱۸

محاسبه‌ی آهنگ زمانی تغییرات تکانه‌ی موج فرودی . . . ۱۹

۲ میدان‌های فرودی

- ۱.۲ موج لیزر گاوسی ۲۳
- ۲.۲ مرتبه‌های بالاتر مدهای لیزر ۲۴
- ۳.۲ معرفی رابطه‌ای برای کانونی کردن میدان‌ها ۲۵
- ۴.۲ میدان‌های لیزر کانونی شده ۲۹

۳ معرفی روش تفاضلات متناهی در حوزه زمان FDTD

- ۱.۳ تفاضلات متناهی ۳۴
- ۲.۳ تقریب تفاضلات متناهی معادله‌ی موج اسکالر ۳۶
- ۳.۳ معادلات ماکسول ۳۷
- ۴.۳ الگوریتم‌ی ۴۱
- ۱.۴.۳ نمادگذاری ۴۴
- ۲.۴.۳ عبارات تفاضلات متناهی برای معادلات ماکسول در سه بعد ۴۵
- ۳.۴.۳ ناحیه فضایی با تغییرات پیوسته خواص مادی ۴۸
- ۴.۴.۳ ناحیه فضایی با تعداد محدودی از محیط‌های مجزا ۵۱
- ۵.۳ پاشندگی عددی و پایداری ۵۲
- ۱.۵.۳ مقدمه ۵۲

۵۳	استخراج رابطه پاشندگی عددی برای انتشار موج در دو بعد	۲.۵.۳
۵۶	تعمیم رابطه پاشندگی عددی به سه بعد	۳.۵.۳
۵۷	مقایسه با حالت پاشندگی ایده آل	۴.۵.۳
۵۸	ناهمسانگردی سرعت فاز عددی	۵.۵.۳
۵۸	مقادیر نمونه سرعت فاز عددی	
۶۳	پایداری عددی	۶.۵.۳
۶۴	تحلیل فرکانس مختلط	
۶۸	بهنجارش عامل کورانت و تعمیم به دو و یک بعد	
۶۹	الگوریتم‌های تغییر یافته مبتنی بر الگوریتم بی برای بهبود پاشندگی عددی	۷.۵.۳
۷۰	تکنیک ۱: متمرکز کردن منحنی سرعت فاز عددی حول c	
۷۱	تکنیک ۲: استفاده از دقت مرتبه چهارم	
۷۴	تکنیک ۳: استفاده از شبکه‌ی با سلول شش وجهی	
۷۷	تکنیک ۴: استفاده از تبدیل فوریه‌ی گسسته	
۸۰	شرایط مرزی جذب کننده	۸.۵.۳
۸۹	فرمول بندی مسائل پراکندگی	۶.۳
۸۹	فرمول بندی میدان پراکندگی خالص	۱.۶.۳
۹۲	فرمول بندی پراکنده‌ی رسانای کامل	
۹۴	فرمول بندی ماده‌ی دارای افت	
۹۵	فرمول بندی میدان کل-میدان پراکندگی	۲.۶.۳

۴ معرفی و توضیح کد مورد استفاده

۹۸	کد فرترن برای فرمول بندی FDTD رسانای کامل	۱.۴
۱۰۰	کد فرترن برای فرمول بندی FDTD دی الکتریک با افت الکتریکی	۲.۴
۱۰۴	معرفی روشی برای انتگرال گیری یک بعدی و دو بعدی	۳.۴
۱۰۵	توضیح کد برنامه	۴.۴
۱۰۶	برنامه اصلی	۱.۴.۴
۱۰۸	زیرروال ZERO	۲.۴.۴
۱۰۹	زیرروال BUILD	۳.۴.۴
۱۱۰	زیرروال DCUBE	۴.۴.۴
۱۱۰	زیرروال SETUP	۵.۴.۴
۱۱۱	زیرروال INITIALTENSOR	۶.۴.۴
۱۱۱	زیرروال های EZSFLD و EYSFLD، EXSFLD	۷.۴.۴
۱۱۲	زیرروال های شرایط مرزی جذب	۸.۴.۴
۱۱۳	زیرروال های HZSFLD و HYSFLD، HXSFLD	۹.۴.۴
۱۱۳	زیرروال SCATSAV	۱۰.۴.۴
۱۱۴	زیرروال TIME_AVERAGE_TENSOR	۱۱.۴.۴
۱۱۴	زیرروال SURFACE_INTEGRATION	۱۲.۴.۴
۱۱۵	توابع HZI و HYI، HXI، EZI، EYI، EXI	۱۳.۴.۴
۱۱۶	توابع DEZI و DEYI، DEXI	۱۴.۴.۴

۱۱۶	.....	SIMPSON2D و SIMPINTEG2D توابع ۱۵.۴.۴
۱۱۶	.....	INT2STR تابع ۱۶.۴.۴
۱۱۷	.....	INITIALIZE.FOR فایل ۱۷.۴.۴
۱۱۷	.....	COMMONA.FOR فایل ۱۸.۴.۴

۵ نتیجه‌گیری و کارهای پیش‌رو

۱۱۹	.....	۱.۵ وارد کردن موج فرودی در فضای مسأله
۱۲۲	.....	۲.۵ انتشار موج در فضای مسأله
۱۳۳	.....	۳.۵ محاسبه‌ی نیرو
۱۳۵	.....	۴.۵ نتیجه‌گیری
۱۳۸	.....	۵.۵ کارهای پیش‌رو
۱۳۹	.....	مراجع

مقدمه

شناسایی پدیده‌های ناشناخته و تحت کنترل درآوردن آنها همواره خواست عالی انسان است. پیشرفت‌های علمی امروز بشر، ریشه در این خواستگاه انسان دارد. از پدیده‌های جالب و مورد توجه می‌توان برهم‌کنش نور و ماده را نام برد که منشأ بسیاری از پدیده‌های طبیعی و تحولات اخیر است. پراکندگی نور از مواد موجب رؤیت آنها می‌شود و وابستگی این پدیده به طول موج نور و کشف این وابستگی باعث شده است تا از نورهای مختلف جهت دیدن قسمت‌های مختلف اجسام استفاده شود. به عنوان مثال با نور مرئی می‌توان تا حدودی اجسام اطراف را شناسایی کرد و با نور اشعه‌ی X می‌توان اطلاعات بیشتری بدست آورد. همه‌ی اینها مدیون تلاش انسان به منظور شناسایی و هدایت پدیده‌های عالم است.

انسان از دیرباز مترصد آن است که توسط نور به اجسام اطراف نیرو وارد کرده و آنها را تحت کنترل درآورد. به دلیل ضعیف بودن نیروهای نوعی در برهم‌کنش نور و ماده تا چند دهه‌ی گذشته این نیروها قابل مشاهده نبود. با پیدایش منبع نور پرشدت لیزر امکان مشاهده‌ی این نوع نیروها فراهم شد و در حال حاضر می‌توان به اجسام میکرونی و زیرمیکرونی، نیروهای تابشی معلومی وارد کرد. با کانونی کردن لیزر، دستیابی به نور با شدت بالاتر و نیروهای تابشی قوی‌تر امکان‌پذیر است. انبرک نوری حاصل تلاش انسان جهت حصول نیروهای تابشی قوی‌تر است و طی ۳۰ سال که از اختراع آن توسط آرتور اشکین می‌گذرد کنکاش‌های بسیاری برای شناسایی علل و عوامل مؤثر جهت بهبود عملکرد و یافتن موارد کاربرد آن صورت گرفته است. به دلیل امکان مطالعه‌ی انفرادی ذرات برهم‌کنش کننده با نور لیزر در انبرک نوری، این ابزار کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف علمی یافته است. مطالعه‌ی اتم‌ها و مولکول‌های منفرد، بافت‌ها و یاخته‌های موجودات زنده، موتورهای مولکولی بیوفیزیکی و ده‌ها مورد دیگر در حوزه‌ی کاربرد این پدیده‌ی نوظهور قرار گرفته است. لذا مطالعه‌ی این ابزار پر قدرت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در مطالعه‌ی این ابزار جنبه‌های مختلف نظری، تجربی و شبیه‌سازی را می‌توان در نظر گرفت.

در این پایان‌نامه سعی بر این است که انتشار امواج الکترومغناطیسی نور لیزر در اطراف کانون عدسی با استفاده از روش تفاضلات متناهی در حوزه زمان (FDTD) جهت حل معادلات ماکسول، شبیه‌سازی شده و در

نهایت نیروی تابشی وارد بر یک ذره در نزدیکی کانون بدست آید.

در این راستا، سعی شده است مطالب این پایان نامه در عین سادگی، رسا و جامع باشد تا خواننده‌ی علاقمند بتواند ضمن آشنایی با اصول FDTD آن را برای مسائل دارای انتشار امواج الکترومغناطیسی بکاربرد.

در فصل اول این پایان نامه سعی در معرفی انبرک نوری از جنبه‌ی تاریخی و نظری شده است. در بخش اول این فصل مختصری از تاریخچه‌ی فشار تابشی با تأکید بر انبرک نوری آورده شده است. بخش دوم، به توصیف نظری این پدیده و راههای محاسبه‌ی نیروی تابشی اختصاص داده شده است. میدان‌های فرودی قبل از کانونی شدن و نحوه‌ی استخراج شکل کانونی آنها در فصل ۲ بیان شده است. معرفی و شرح نسبتاً جامعی از روش تفاضلات متناهی در حوزه زمان جهت حل عددی معادلات حاکم بر امواج الکترومغناطیس – معادلات ماکسول – در فصل ۳ آورده شده است. در فصل ۴ به تشریح کد نوشته شده (در لوح فشرده پیوست) جهت محاسبه‌ی میدان‌های پراکندگی حاصل از برهم کنش نور لیزر با یک ذره‌ی دی‌الکتریک کروی با استفاده از فرمول‌بندی میدان پراکندگی خالص FDTD و حصول نیروی تابشی وارد بر ذره پرداخته شده است. بیان مختصری از فعالیت‌های انجام شده، نتایج و کارهای پیش رو در فصل ۵ آمده است.

در متن پایان نامه نمادگذاری کمیات برداری، با حروف درشت مانند E انجام شده است.

مسلماً متن پایان نامه از اشکالات فنی و علمی تهی نبوده و مساعدت خوانندگان گرامی را جهت بهبود آن می‌طلبید.

فصل اول

انبرک نوری

در بخش اول این فصل مختصری از تاریخچه‌ی فشار تابشی با تأکید بر انبرک نوری بیان می‌شود و در بخش دوم توصیف نظری انبرک نوری می‌آید.

۱.۱ تاریخچه فشار تابشی و انبرک نوری

در سال ۱۶۱۹، یوهانس کپلر^۱ بیان کرد که اثرات مکانیکی نور ممکن است جوابگوی انحراف دم‌های ستاره‌های دنباله‌دار که وارد منظومه‌ی شمسی می‌شوند، باشد. نظریه‌ی کلاسیکی ماکسول^۲ در سال ۱۸۷۳، نشان داد میدان تابشی با خود تکانه حمل می‌کند و «فشار نور^۳» بر اجسامی که با میدان تابشی روشن شده‌اند، اعمال می‌شود. در سال ۱۹۰۱ لبدف^۴ فیزیک‌دان روسی، توانست برای اولین بار بطور تجربی وجود فشار تابشی را مشاهده کند. وی با کانونی کردن نور یک لامپ قوس الکتریک بر سطح یک ورقه‌ی نازک پلاتینیوم به ضخامت 0.002 mm

^۱ Johannes Kepler

^۲ classical Maxwell's theory

^۳ light pressure

^۴ Lebedev

که از یک رشته قابل انعطاف آویزان بود، مشاهده کرد که با روشن کردن لامپ، این ورقه نسبت به حالت تعادل خود اندکی می‌چرخد. با محاسبه‌ی مقدار چرخش این ورقه نسبت به حالت قبل از روشن شدن لامپ، مقدار نیروی تابشی وارد بر آن را بدست آورد [۱]. در سال ۱۹۰۵، انیشتین^۵ مفهوم فوتون^۶ را معرفی کرد و نشان داد که انتقال انرژی بین نور و ماده با مقادیر گسسته‌ای^۷ اتفاق می‌افتد و روشن شد بقای تکانه و انرژی در وقایع میکروسکوپی اهمیت فراوان دارد. انتقال گسسته تکانه بین فوتون‌ها (پرتوهای X) و دیگر ذرات (الکترون‌ها) به طور آزمایشی توسط کامپتون^۸ در سال ۱۹۲۵ نشان داده شد و انتقال تکانه‌ی پس‌زنی^۹ از فوتون‌ها به اتم‌ها در سال ۱۹۳۳ توسط فریش^{۱۰} مشاهده شد. مطالعات مهمی روی کنش فوتون‌ها با اتم‌های خنثی در دهه ۱۹۷۰ توسط لیتوخوف^{۱۱} و دیگران بویژه گروه اشکین^{۱۲} انجام شد. گروه اشکین، پیشنهاد خم کردن و کانونی کردن پرتوهای اتمی و تله‌اندازی اتم‌ها در پرتوهای لیزر کانونی شده را دادند. فکری که یک جسم ممکن است حین برهم‌کنش با میدان تابشی سرد شود، در سال ۱۹۲۹ توسط پرینگشیم^{۱۳} بیان شده بود. با این حال، اولین پیشنهاد برای سرد کردن اتم‌ها با پرتوهای لیزر در سال ۱۹۷۵ توسط هَنش^{۱۴} و شاولو^{۱۵} مطرح شد [۲]. این پیشنهاد نقطه آغازی برای یک سری از آزمایشهای جالبی شد که منجر به جایزه‌ی نوبل ۱۹۹۷ فیزیک گردید.

در اوایل دهه‌ی شصت میلادی با اختراع لیزریک منبع نور پر شدت و با توان بالا در اختیار دانش‌پیشگان قرار گرفت که به وسیله‌ی آن می‌توانستند اثرات فشار تابشی را راحت‌تر مشاهده کنند. اشکین فردی بود که از مدتها قبل از اختراع لیزر به آشکارسازی فشار تابشی علاقمند بود و برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ نشان داد باریکه‌ی لیزر توانایی جابجا کردن اجسام میکرونی را دارد [۳]. در آزمایشی که او ترتیب داده بود، از کرات

Einstein^۵

photon^۶

discrete quanta^۷

Compton^۸

recoil momentum^۹

Frisch^{۱۰}

Letokhov^{۱۱}

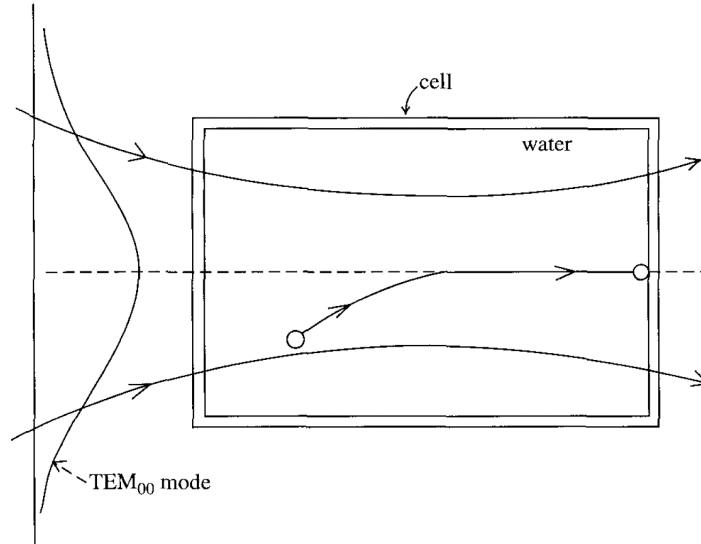
Arthur Ashkin^{۱۲}

Pringsheim^{۱۳}

Hansch^{۱۴}

Schawlow^{۱۵}

پلی‌استایرن^{۱۶} با قطرهای $2.5 \mu m$ و $10 \mu m$ به عنوان ذرات میکرونی برهم‌کنش‌کننده با لیزر دارای مد گاوسی TEM_{00} و طول موج $\lambda = 514.5 nm$ و توان چند میلی‌وات استفاده کرد (شکل ۱-۱). درانتخاب نوع ذرات



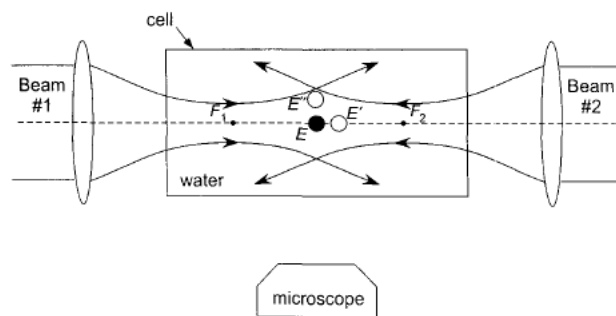
شکل ۱-۱ با روشن شدن باریکه‌ی لیزری با مد گاوسی، مشاهده می‌شود که ذرات به سمت جلو و متمایل به محور باریکه حرکت کرده و پس از قرار گرفتن روی محور باریکه در امتداد آن به حرکت خود ادامه می‌دهند تا اینکه به دیواره‌ی مقابل برسند.

می‌بایست از ذراتی استفاده می‌کرد که جذب پایینی داشته باشند، زیرا جذب نور باعث آسیب دیدن ذره و یا ایجاد نیروهای گرمایی ناخواسته می‌شود. اگرچه ذرات فلزی تا حد بالایی بازتابنده هستند، اما هنوز چند درصد جذب دارند بنابراین وی از ذرات پلی‌استایرن استفاده نمود. این ذرات برای این منظور بسیار مناسب هستند؛ زیرا کاملاً شفاف‌اند، بطور طبیعی کلوئیدی هستند، در آب شناور می‌مانند، تا حد زیادی تک اندازه‌اند و در اندازه‌های مختلف قابل دسترسی هستند.

مشاهده شد با روشن شدن لیزر، ذرات در جهت تابش نور به حرکت درآمده و تا دیواره‌ی سمت راست محفظه حرکت می‌کنند. وی همچنین در این آزمایش مشاهده کرد که نیروی تابشی نه تنها در جهت باریکه‌ی فرودی مؤلفه دارد، بلکه یک مؤلفه نیز در جهت نقاط پر شدت دارد و وجود این مؤلفه باعث می‌شود ذراتی که در حاشیه‌های نور لیزر قرار گرفته بودند به سمت محور باریکه شتاب و در نهایت بر روی آن قرار گرفته و در

امتداد آن به حرکت خود ادامه دهند. در این آزمایش ضریب شکست ذره ($n_{polystyrene} = 1.57$) از محیط اطراف آن ($n_{water} = 1.33$) بیشتر بود. وی همین آزمایش را با حباب‌های هوا ($n_{air} \simeq 1$) که در گلیسرول ($n_{glycerol} = 1.47$) شناور بودند انجام داد و مشاهده کرد اگر ضریب شکست ذره از محیط اطراف آن کمتر باشد ذره به سمت بیرون از محور باریکه (برعکس حالت قبل) هدایت می‌شود [۴].

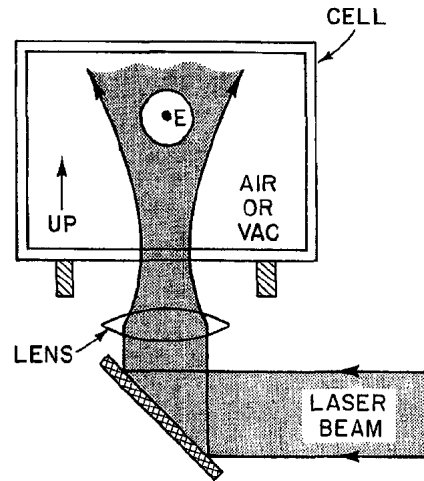
در آزمایش فوق الذکر اشکین توانست ذره را توسط نور در دو بعد (در صفحه‌ی عمود بر محور باریکه) محدود کند و به عبارتی یک تله‌ی نوری دوبعدی ایجاد نماید. به منظور ساختن تله‌ی سه‌بعدی آزمایش با دو باریکه مشابه و در خلاف جهت یکدیگر تکرار شد. در این آزمایش مد عرضی باریکه‌های لیزر باعث نگه‌داشتن کره میکرونی بر روی محور مشترک باریکه‌ها می‌شد در حالیکه مؤلفه‌های محوری نیروهای تابشی که این بار در خلاف جهت هم بودند، همدیگر را تضعیف می‌کردند. بنابراین برای اولین بار یک تله‌ی نوری سه‌بعدی موسوم به «تله‌ی دو باریکه‌ای»^{۱۷} ساخته شد (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۲ تله‌ی دو باریکه‌ای

از آنجا که مؤلفه‌ی محوری نیروی تابشی، عامل مخلی در ایجاد تله‌ی سه‌بعدی با استفاده از یک باریکه‌ی لیزر بود، اشکین تصمیم گرفت با استفاده از تقابل آن با نیروی وزن ذره، آن را خنثی کرده و تله‌ای سه‌بعدی ایجاد نماید که منجر به آزمایش تعلیق یک کره دی‌الکتریک در هوا (خلاً) شد (شکل ۱-۳). در این آزمایش یک باریکه لیزر با مد گاوسی در راستای قائم و روبه بالا کانونی شده است. در این حالت در شرایط خاصی مؤلفه‌ی محوری نیروی تابشی وارد بر ذره با نیروی وزن آن موازنه شده و مد عرضی لیزر باعث قرار گرفتن کره

^{۱۷} Double-Beam Optical Trap



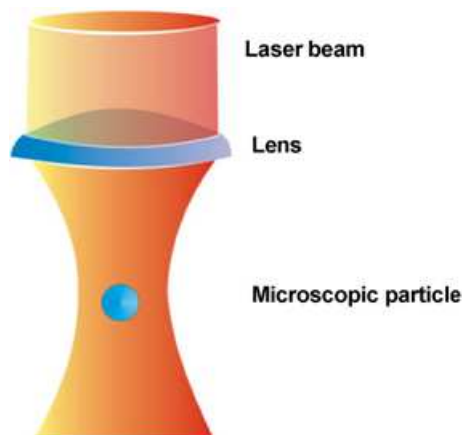
شکل ۱-۳ معلق نگه داشتن یک میکروذره با موازنه‌ی نیروی وزن ذره و مؤلفه‌ی محوری نیروی پراکندگی.

بر روی محور باریکه می‌شود که حاصل آن معلق ماندن ذره روی محور باریکه است. [۵]

مؤلفه‌ی عرضی نیروی تابشی از گرادیان شدت مد عرضی لیزر ناشی می‌شود. از این رو اگر در راستای محوری نیز گرادیانی مشابه، ایجاد می‌گردید، منجر به تله‌ای سه‌بعدی می‌شد. بنابراین اشکین معروف‌ترین آزمایش خود را در سال ۱۹۸۶ انجام داد که در آن تنها از یک باریکه‌ی لیزر با مد عرضی TEM_{00} برای تله‌اندازی کروی دی‌الکتریک میکرونی در سه بعد استفاده شده بود. اشکین برای ایجاد گرادیان شدت در راستای محوری، با استفاده از یک عدسی شیئی میکروسکوپی با قدرت کانونی بالا، یک باریکه‌ی لیزر با مد عرضی TEM_{00} را کانونی کرد (شکل ۱-۴). با کانونی کردن باریکه لیزر، علاوه بر ایجاد گرادیان شدت عرضی قوی‌تر، در راستای محوری نیز گرادیان شدتی بوجود آمد که باعث ظهور مؤلفه‌ی نیرویی در جهت گرادیان شدت محوری، گردید. این مؤلفه‌ی نیرو که حاصل گرادیان شدت محوری است همراه با مؤلفه‌های نیروی حاصل از گرادیان شدت عرضی، در سه‌بعد نیرویی را تشکیل می‌دهند که به «نیروی گرادیانی»^{۱۸} معروف است. در مقابل این نیرو، نیرویی که سعی در راندن ذره در راستای انتشار پرتولیزر داشته و از برهم کنش پرتولیزر با ذره به عنوان یک پراکننده‌ی نور ناشی می‌شود، «نیروی پراکندگی»^{۱۹} نام دارد. هرگاه نیروی گرادیانی در امتداد محور باریکه بر نیروی پراکندگی غلبه کند ذره در امتداد محور نیز محدود شده و در محل کانون به تله می‌افتد. بنابراین تله‌ی

^{۱۸} gradient force

^{۱۹} scattering force



شکل ۱-۴ طرح‌واره‌ای از یک انبرک نوری. با کانونی کردن باریکه‌ی لیزر می‌توان علاوه بر راستای عرضی در امتداد محوری نیز یک گرادیان شدت ایجاد کرد که این امر باعث محدود شدن ذره در سه بعد می‌شود.

نوری بوجود آمد که تنها با استفاده از یک باریکه لیزر می‌توانست ذره را در سه بعد محدود کند. این تله‌ی نوری، به «تله‌ی تک باریکه‌ای^{۲۰}» یا «انبرک نوری^{۲۱}» معروف است و امروزه به طور گسترده در زمینه‌های مختلف فیزیک و زیست‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اولین آزمایش میکرو دستکاری موجودات زنده در سال ۱۹۸۷ انجام شد. در این آزمایش ابتدا از یک لیزر آرگون، با طول موج ۵۴۱۵ آنگستروم، استفاده شد. کاربرد این لیزر در انبرک نوری، گرچه امکان تله‌اندازی موجودات زنده را فراهم کرد، ولی جذب زیاد مواد زیستی در طول موج مذکور باعث شد تا این موجودات پس از قرار گرفتن در تله، به علت افزایش دما بمیرند. از آنجا که میزان جذب مواد زیستی در ناحیه‌ی فروسرخ نزدیک^{۲۲} بسیار کم‌تر است، همین آزمایش با یک لیزر نئودیمیم-یاگ^{۲۳} تکرار شد و نتیجه بسیار رضایت بخش بود به طوری که باکتری به تله انداخته شده علاوه بر زنده ماندن، رشد کرده و تکثیر یافت. [۶]

در ایران اولین فعالیت در زمینه‌ی انبرک نوری، مربوط به کارهای دکتر سیدریحانی است که ضمن وارد شدن

^{۲۰} Single-Beam Optical Trap

^{۲۱} Optical Tweezers

^{۲۲} Near Infra-Red

^{۲۳} Nd-YAG

به این حوزه از تکنولوژی، اولین دستگاه انبرک نوری را در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه‌ی زنجان ساخته و بهینه‌سازی نمود [۶]. سپس در راستای بهبود کارایی این ابزار روشی را برای کاهش ابیراهی کروی ناشی از افزایش عمق تله‌ی نوری ارائه داد به طوری که در هر عمق دلخواه می‌توان به بیشینه‌ی بهره‌ی تله دست یافت [۶، ۷]. پس از آن صمدی در سال ۲۰۰۸ بطور تجربی نشان داد که هرگاه نسبت اندازه‌ی لکه‌ی باریکه‌ی لیزر به اندازه‌ی دهانه‌ی ورودی عدسی شیئی 0.7 باشد بهره‌ی تله‌ی نوری بیشینه می‌گردد [۸]. شگری در سال ۲۰۰۹ نشان داد که نیروی وارد بر ذره در نزدیکی‌های مرکز تعادل ذره برای ذرات کوچکتر از 1.65 میکرون بصورت خطی با فاصله از مرکز تعادل تغییر می‌کند و هرگاه اندازه‌ی ذره بزرگتر از 1.65 میکرون باشد این ناحیه خطی به دو ناحیه خطی با ثابت سختی تله‌ی متفاوت تبدیل می‌شود [۹]. در همان سال چراغیان تأثیر قطبش خطی پرتو لیزر گاوسی را بر تقارن سمتی تله‌ی نوری در شرایط کمینه ابیراهی، بررسی کرده و نتیجه گرفت که تله تقارن سمتی ندارد و مقدار این عدم تقارن به اندازه‌ی نسبی ذره و طول موج بستگی دارد [۱۰].

تا بدینجا تاریخچه مختصری در مورد فشار تابشی با تأکید بر انبرک نوری آورده شد [۱۱، ۶، ۱۰]. در بخش بعد توصیف نظری انبرک نوری به اختصار بیان می‌شود.

۲.۱ توصیف نظری انبرک نوری

با کانونی کردن نور یک لیزر گاوسی، در اطراف کانون گرادیان شدتی در جهت کانون بوجود می‌آید که عامل ایجاد نیرویی به سمت کانون است. ذرات اطراف کانون (در صورت وجود) این نیرو را احساس می‌کنند. در صورتی که این نیرو به قدر کافی قوی باشد تا بر نیروهای دیگر وارد بر ذره غلبه نماید، ذره به طرف کانون کشیده می‌شود و در آنجا به حالت سکون نسبی می‌رسد و در اصطلاح به «تله» می‌افتد. با توجه به امکان تغییر پارامترهای خارجی (از قبیل تنظیمات کیفی و کمی و موضعی لیزر و عدسی) می‌توان ذره‌ی به تله افتاده را به دلخواه جابجا کرد و کمیات مختلفی را اندازه گرفت. این سازوکار، اساس «تله‌ی نوری» [۲۴] یا «انبرک نوری» [۲۵]

optical trap ۲۴

optical tweezers ۲۵

است. در مطالعه‌ی نظری این پدیده، نسبت اندازه‌ی ذره (d)، به تنها طول مشخصه‌ی فضای مسأله، یعنی طول موج نور (λ)، مهم می‌شود. بنابراین برای توصیف نظری آن، معمولاً سه محدوده‌ی طولی را در نظر می‌گیرند:

(۱) حد رایلی^{۲۶} ($d \ll \lambda$) (که اندازه‌ی ذره در مقایسه با طول موج خیلی کوچک است).

(۲) حد اپتیک هندسی ($d \gg \lambda$) (که اندازه‌ی ذره در مقایسه با طول موج بزرگ است).

(۳) محدوده یا رژیم می^{۲۷} ($d \approx \lambda$) (که ابعاد ذره در حدود طول موج است).

البته مبانی رژیم می، کلی است و شامل دو محدوده‌ی دیگر نیز می‌شود ولی از آنجا که توصیف نظری دو محدوده اول که دو حالت حدی هستند، نسبتاً ساده است، معمولاً این تقسیم‌بندی انجام می‌شود.

در بیشتر موارد کاربرد دستگاه انبرک نوری، از لیزر نئودیمیم-یاگ^{۲۸} با طول موج یک میکرون برای تله‌اندازی ذره با ابعاد میکرونی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه ابعاد نوعی ذرات مورد مطالعه حدود یک میکرون است ($d \approx \lambda$)، مطالعه‌ی رژیم می، از اهمیت بالایی برخوردار است ولی به دلیل پیچیده بودن برهم‌کنش نور و ماده در این رژیم، توصیف نظری کاملی برای آن وجود ندارد و محاسبات در این رژیم معمولاً به صورت عددی انجام می‌شود که در ادامه به پاره‌ای از آنها اشاره شده و روشی که در این پایان‌نامه پی‌گیری شده است، نسبتاً مفصل بیان می‌شود.

۱.۲.۱ حد رایلی

در این حد که ذره‌ی به تله افتاده خیلی کوچکتر از طول موج است، نیروی تله‌ی نوری با استفاده از مدل دو قطبی بدست می‌آید. در این مدل، میدان الکترومغناطیسی باریکه‌ی لیزر، به طور موضعی دو قطبی‌هایی را بر روی جسم القا می‌کند. از نیروی وارد بر این دو قطبی‌ها، نیروی تله بدست می‌آید.

Rayleigh^{۲۶}

Mie^{۲۷}

Nd-YAG^{۲۸}