

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



تله‌اندازی بهینه‌ی هواویزها به وسیله‌ی انبرک نوری

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد

محمد صادقی

استاد راهنما: سید نادر سید ریحانی

دی ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم بہ
دوست عزیزم
ہمدی

شکر و قدردانی

از خانواده‌ام به‌خصوص پدر و مادرم به‌خاطر زحمات بی‌دریغ‌شان ممنونم.

از آقای دکتر ثبوتی که همچون پدری مهربان برای همه دانشجویان و دانشگاه هستند، به‌خاطر ایجاد چنین محیطی مناسب برای آموزش و پژوهش، سپاسگزارم.

از استاد عزیزم دکتر سید نادر سید ریحانی به‌خاطر کمک‌ها و راهنمایی‌های ارزشمندشان متشکرم.

در نهایت از همه دوستان و هم‌کلاسی‌های خوب و عزیزم که در این مدت روزهای خوب و به‌یادماندنی را با آنها داشتم، متشکرم و برای همه آنها صمیمانه آرزوی موفقیت و سربلندی می‌کنم.

چکیده

انبرک نوری باریکه لیزر به شدت کانونی شده است که قادر به تله اندازی و دست کاری ذرات در ابعاد میکرونی و زیر میکرونی است. در سال های اخیر آزمایش هایی در زمینه میکرو دست کاری ذرات در هوا نیز انجام شده است که اطلاعات با ارزشی در مورد هواویزها به دست داده اند. استفاده از روغن های غوطه وری با ضرایب شکست مختلف منجر به کاهش یا افزایش ابیراهی کروی می شود. به ازای روغن با ضریب شکست معین، میزان ابیراهی کروی در عمق مشخصی کمینه می شود. این عمق، عمق بهینه نامیده می شود که در آن بهره تله نوری حداکثر است. همچنین اثر طول لوله مکانیکی، در رسیدن به وضعیت بهینه، از اهمیتی ویژه برخوردار است. در این پایان نامه عمق بهینه تله نوری، برای قطره های میکرونی (محلول آب نمک) تله اندازی شده در هوا، به طور تجربی به دست آورده شده است. نتایج تجربی ما نشان می دهند که هر روغن غوطه وری یک عمق بهینه دارد و به ازای $0/01$ تغییر در ضریب شکست روغن غوطه وری، عمق بهینه $1/4$ میکرون جابه جا می شود. در فصل آخر این پایان نامه نتایج تجربی این کار ارائه شده و نتایج به دست آمده با نتایج تئوری مقایسه شده است که از توافق خوبی برخوردارند. از این نتیجه برای تله اندازی میکرو کره های سیلیکا در هوا استفاده شد.

واژه های کلیدی: تله نوری، روغن غوطه وری، عمق بهینه، طول لوله

فهرست

۱	انبرک نوری	۱
۲	تاریخچه	۱.۱
۸	روش‌های نظری برای مطالعه انبرک نوری	۲.۱
۹	رژیم رایلی	۱.۲.۱
۱۱	رژیم می	۲.۲.۱
۱۲	رژیم اپتیک هندسی	۳.۲.۱
۱۴	درجه‌بندی انبرک نوری	۳.۱
۱۶	روش تحلیل طیف توانی	۱.۳.۱
۲۰	روش نیروی مقاومت سیال	۲.۳.۱
۲۱	روش همپاری انرژی	۳.۳.۱
۲۲	روش تحلیل انرژی پتانسیل	۴.۳.۱
۲۲	چیدمان انبرک نوری	۴.۱
۲۴	لیزر	۱.۴.۱
۲۵	میکروسکوپ	۲.۴.۱
۳۲	فوتودیود	۳.۴.۱

۳۷	تله‌اندازی نوری هواویزها	۲
۳۷	..... هواویز	۱.۲
۴۰	..... تاریخچه تله‌اندازی در هوا	۲.۲
۴۱	..... ویژگی‌های تله‌اندازی هواویزها	۳.۲
۴۱	..... تولید نمونه‌های هواویز و هدایت آنها به سمت تله	۴.۲
۴۴	..... مه‌پاش	۱.۴.۲
۴۵	..... شارش هواویزها و طراحی محفظه نمونه	۲.۴.۲
۴۶	..... ملاحظات تله‌اندازی هواویزهای مایع	۵.۲
۴۷	..... فشار بخار	۱.۵.۲
۵۱	..... تبخیر	۲.۵.۲
۵۴	..... جذب	۳.۵.۲
۵۶	..... اندازه قطره تله‌اندازی شده و توان تله	۴.۵.۲
۵۸	..... مقایسه کیفیت تله نوری در طول موج‌های ۱۰۶۴ نانومتر و ۵۳۲ نانومتر	۶.۲
۶۰	..... تله‌اندازی هواویزهای جامد	۷.۲
۶۴	نتایج آزمایش	۳
۶۵	..... وسایل مورد استفاده در آزمایش	۱.۳
۶۵	..... محفظه نمونه	۱.۱.۳
۶۸	..... سرلوله	۲.۱.۳
۶۹	..... ابیراهی کروی	۲.۳
۷۳	..... اثر روغن غوطه‌وری بر جابه‌جایی کانون	۳.۳
۷۴	..... اندازه‌گیری قطر ذره	۴.۳
۷۷	..... یافتن سطح شیشه	۵.۳

۷۹	.....	۶.۳	بررسی نظری
۸۲	.....	۷.۳	نتایج تجربی
۸۸	.....	۸.۳	نتیجه گیری
۹۰	.....		مراجع
۹۵	.....		واژه‌نامه فارسی به انگلیسی
۹۹	.....		واژه‌نامه انگلیسی به فارسی

لیست تصاویر

- ۱.۱ انحراف دم ستاره دنباله‌دار در عبور از کنار خورشید [۳۵]. ۲
- ۲.۱ تابش پرتو نور با تکانه p_1 بر سطح یک آینه بازتابنده کامل. ۳
- ۳.۱ باریکه لیزر ذره را به جلو و متمایل به محور باریکه حرکت می‌دهد. پس از قرار گرفتن روی محور باریکه ذره به حرکت خود ادامه داده تا به دیواره مقابل برسد [۱۳]. ۴
- ۴.۱ تله دوباریکه‌ای [۱۳]. ۵
- ۵.۱ تله شناوری [۱۴]. ۶
- ۶.۱ با کانونی کردن باریکه لیزر می‌توان علاوه بر راستای عرضی در امتداد محوری نیز گرادیان شدت ایجاد کرد که این امر باعث محدود شدن ذره در سه بعد می‌شود [۳۴]. ۷
- ۷.۱ نمایش کیفی چگونگی وارد شدن نیرو به یک کره شفاف. شکل a نیروی گرادیانی عرضی ناشی از باریکه گوسی را نشان می‌دهد. شکل‌های b و c نیروی گرادیانی محوری را نشان می‌دهند [۳۵]. ۱۳
- ۸.۱ عبور پرتو از داخل کره [۳۵]. ۱۵
- ۹.۱ شباهت نیروی تله با نیروی فنر [۱۱]. ۱۶
- ۱۰.۱ برازش معادله ۲۰.۱ بر داده‌های تجربی (نقطه‌ها) برای کره پلی‌استایرن غوطه‌ور در آب. محورهای شکل لگاریتمی هستند. ۱۸

- ۱۱.۱ برآزش معادله ۲۰.۱ بر داده‌های تجربی برای قطره آب نمک در هوا. محورهای
- ۱۹ شکل لگاریتمی هستند.
- ۱۲.۱ وارد کردن اثرات سطحی و پارامترهای هوا در نرم‌افزار طیف توانی، جهت تحلیل
- ۲۰ ذره تله شده در هوا.
- ۱۳.۱ چیدمان عمومی انبرک نوری.
- ۲۳ طرح‌واره انبرک نوری مورد استفاده در این پایان‌نامه.
- ۲۴ ۱۴.۱ تصویر میکروسکوپ وارون به کار گرفته شده در این پایان‌نامه.
- ۲۶ ۱۵.۱ ابیراهی کروی.
- ۲۷ ۱۶.۱ باریکه لیزر به طور موازی به عدسی تابیده و بیرونی‌ترین پرتو تحت زاویه θ_{max}
- ۲۸ کانونی می‌شود.
- ۱۸.۱ مفهوم طول لوله مکانیکی. (a) طول لوله محدود (b) طول لوله بی‌نهایت. (BFP)
- ۲۹ صفحه کانون پستی، d قطر باریکه و D اندازه روزنه است [۱۶].
- ۳۰ ۱۹.۱ تصویر عدسی شیئی به کار گرفته شده در این پایان‌نامه.
- ۳۱ ۲۰.۱ تصویر عدسی چگالنده به کار گرفته شده در این پایان‌نامه.
- ۲۱.۱ الف) مسیر پرتوهای روشن کننده نمونه و پرتوهای تصویرساز رسم شده‌اند [۱۵].
- ب) جهت تنظیم نوردهی کلر ابتدا با تنظیم دیافراگم‌ها و عدسی‌ها یک تصویر مبهمی از جسم و دیافراگم میدان دیده می‌شود (a). با تنظیم دقیق عدسی‌ها و بستن کامل دیافراگم تصویر چند وجهی مشاهده می‌گردد (b). تصویر چند وجهی به وسط میدان دید آورده می‌شود (c). پس از وضوح کامل، دیافراگم‌های بسته را باز می‌کنند (d).
- ۳۲

- ۲۲.۱ چگونگی کارکرد فوتودیود. در شکل a هر ۴ فوتودیود به طور مساوی روشن شده‌اند و در نتیجه ولتاژ یکسانی ایجاد می‌کنند. در شکل b فوتودیودهای ۱ و ۲ روشن شده و تولید ولتاژ می‌کنند. در شکل c فوتودیود ۱ روشن نشده و ولتاژ آن صفر است، فوتودیود ۴ بیش از بقیه روشن شده که ولتاژ بیشتری نیز ایجاد می‌کند [۳۶]. . . . ۳۴
- ۲۳.۱ نمودار ولتاژ-جابه‌جایی که از جاروب کره دی الکتریک ۲/۱ میکرونی، چسبیده به سطح شیشه لامل، توسط لیزر به دست می‌آید. ضریب تبدیل برابر 205 nm/V است [۱۶]. . . . ۳۵
- ۱.۲ تشکیل قطره‌های ابر بر اساس مقدار هواویزهای موجود در هوا متفاوت است. در شکل سمت راست قطره‌های ریز ابر به دلیل هواویزهای زیاد تشکیل شده‌اند، در شکل سمت چپ قطره‌های بزرگتر ابر به دلیل هواویزهای کمتر تشکیل شده‌اند و هر کدام مقدار بازتاب متفاوتی برای نور خوشید دارند [۳۶]. . . . ۳۹
- ۲.۲ شمایی از هسته تشکیل باران به همراه قطره‌های ابر و یک قطره باران [۳۶]. . . . ۳۹
- ۳.۲ طرح‌واره روش مورد استفاده گروه امری و همکاران جهت تله‌اندازی هواویزها [۱۷]. ۴۲
- ۴.۲ طرح‌واره روش مورد استفاده گروه ماگم و همکاران جهت تله‌اندازی هواویزها [۱۸]. ۴۳
- ۵.۲ مه‌پاش مورد استفاده در این پایان‌نامه. . . . ۴۴
- ۶.۲ محل قرارگیری مخزن مایع (A) و نوسان‌گر (B) [۱۹]. . . . ۴۵
- ۷.۲ نوسان‌گر و شبکه توری مه‌پاش [۱۹]. . . . ۴۶
- ۸.۲ سرلوله نوعی مورد استفاده با مه‌پاش $U22$ [۲۰]. . . . ۴۷
- ۹.۲ منحنی فشار بخار برای آب [۲۱]. . . . ۴۸
- ۱۰.۲ منحنی‌های فشار بخار کل و فشار بخار جزئی محلول‌هایی که نسبت به قانون رائول انحراف منفی دارند. خط‌های سیاه بر مبنای قانون رائول رسم شده‌اند [۲۱]. . . . ۴۹
- ۱۱.۲ تغییر ضریب شکست محلول آب نمک بر حسب میزان غلظت نمک. . . . ۵۰

- ۱۲.۲ توزیع انرژی جنبشی در میان مولکول‌های یک مایع [۲۱]. ۵۱
- ۱۳.۲ قطر قطره آب برحسب زمان برای رطوبت‌های مختلف. قطر اولیه قطره آب ۵ میکرون می‌باشد. منحنی‌ها نرخ تبخیر را برای رطوبت‌های نسبی مختلف محیط اطراف، از ۱۰۰٪ (قرمز) تا ۹۹٪ (قهوه‌ای) با گام‌های ۰/۲٪ نشان می‌دهند [۲۰]. ۵۳
- ۱۴.۲ تصاویر تبخیر قطره. a: در تله‌اندازی اولیه (ثانیه صفرم)، b: نقطه تعادل اولیه (بعد از ۲ ثانیه)، c: بعد از ۸۰ ثانیه. d: بعد از ۱۲۰ ثانیه. ۵۴
- ۱۵.۲ نمودار مقدار جذب (A) بر حسب طول موج که نشان‌دهنده یک فرورفتگی در مقدار جذب در نزدیکی طول موج ۱۰۶۴nm است [۲۰]. ۵۵
- ۱۶.۲ قطر اولیه قطره‌های آب نمک ۲ درصد تله‌اندازی شده با توان نوری. توان در محل تله اندازه‌گیری شده است [۲۰]. ۵۶
- ۱۷.۲ اختلاف بین نیروی گرادیانی و نیروی پراکندگی ($F_g - F_s$) بر حسب گشودگی عددی عدسی شیئی برای ذره پلی استایرن ۵ میکرونی غوطه‌ور در آب و توان ۵ میلی وات در محل تله [۲۶]. ۵۷
- ۱۸.۲ مقایسه‌ی قطر اولیه قطره با توان تله در ۵۳۲ نانومتر (خط آبی) و در ۱۰۶۴ نانومتر (خط قرمز). محدوده‌های خطا، بازه‌ی قطر قطره تله شده در هر توان تله را نشان می‌دهند. [۲۶]. ۵۹
- ۱۹.۲ تصویر محفظه نمونه مورد استفاده (شکل سمت چپ). روزانه ایجاد شده بر روی سطح لامل با استفاده از مته الماسی (شکل سمت راست) به‌وجود آمده است. بعد از تله‌اندازی ذرات در زیر سوراخ، محل تله را به سمت بالا جابه‌جا می‌کنیم. ۶۱

- ۲۰.۲ تصویر میکروگره سیلیکای ۰/۹۷ میکرونی. در شکل سمت چپ میکروگره درون تله و به فاصله ۸ میکرونی از شیشه قرار دارد. با مسدود کردن نور لیزر میکروگره از تله خارج می‌شود (شکل سمت راست). سختی تله ۰/۶۲ پیکونیوتن بر میکرومتر محاسبه شد و توان لیزر در خروجی لیزر تا قبل از عدسی شیئی ۱۰ میلی‌وات اندازه‌گیری شد. ۶۲
- ۲۱.۲ تصویر میکروگره سیلیکای ۱/۸۶ میکرونی. در شکل سمت چپ میکروگره درون تله و به فاصله ۱۶ میکرونی از شیشه قرار دارد. با مسدود کردن نور لیزر میکروگره از تله خارج می‌شود (شکل سمت راست). سختی تله ۰/۵۵ پیکونیوتن بر میکرومتر محاسبه شد و توان لیزر در خروجی لیزر تا قبل از عدسی شیئی ۱۴ میلی‌وات اندازه‌گیری شد. ۶۳
- ۲۲.۲ تصویر میکروگره سیلیکای ۳/۰۱ میکرونی. در شکل سمت چپ میکروگره درون تله و به فاصله ۱۲ میکرونی از شیشه قرار دارد. با مسدود کردن نور لیزر میکروگره از تله خارج می‌شود (شکل سمت راست). سختی تله ۰/۴۸ پیکونیوتن بر میکرومتر محاسبه شد و توان لیزر در خروجی لیزر تا قبل از عدسی شیئی ۱۸ میلی‌وات اندازه‌گیری شد. ۶۳
- ۱.۳ مراحل ساخت محفظه نمونه برای تله‌اندازی نمونه‌های کلوئیدی. ابتدا لام و لامل را با استفاده از چسب دو طرفه ۱۰۰ میکرونی به هم چسبانده (مراحل ۱ و ۲) و سپس نمونه را توسط نمونه‌گیر به داخل محفظه ایجاد شده تزریق می‌کنیم (مرحله ۳).
 نهایتاً دو طرف این محفظه را با روغن سیلیکون می‌بندیم (مرحله ۴). ۶۶
- ۲.۳ طرح‌واره محفظه نمونه مورد استفاده در این پایان‌نامه. قطر روزنه A حدود ۲ میلی‌متر، قطر روزنه B حدود ۱ میلی‌متر و فاصله A تا B حدود ۵ میلی‌متر است.
 ذره مورد نظر درست در زیر روزنه B تله‌اندازی می‌شود. ۶۸

۶۹	مراحل ساخت محفظه نمونه برای هواویزهای مایع.	۳.۳
۷۰	سرلوله مورد استفاده در این پایان‌نامه.	۴.۳
۷۱	شمایی از کانونی شدن پرتوی لیزر بعد از عبور از چند مرز تخت، وقتی که ضریب شکست روغن غوطه‌وری از n_1 به n_2 افزایش یافته است.	۵.۳
۷۲	چگونگی تاثیر طول لوله مکانیکی برای تله‌اندازی در عمق‌های زیاد.	۶.۳
۷۵	جابه‌جایی پرتوی کناری برای روغن‌های غوطه‌وری مختلف.	۷.۳
۷۶	نمودار درجه‌بندی پیکسل بر حسب جابه‌جایی.	۸.۳
۷۶	تصویر ذره پلی‌استایرن ۳ میکرونی برای تعیین قطر ذره.	۹.۳
۷۷	تصویر قطره آب نمک ۴ میکرونی تله شده.	۱۰.۳
۷۷	طرح پراش نور لیزر در نزدیکی سطح شیشه لامل.	۱۱.۳
۷۸	توزیع شدت محوری (a) و گرادیان شدت متوسط (AIG) در راستای محوری (b) برای یک ذره تله‌اندازی شده در هوا [۳۷].	۱۲.۳
۷۹	فرکانس گوشه بر حسب عمق برای روغن غوطه‌وری با ضریب شکست ۱/۵۱۸ (شکل سمت راست) و روغن غوطه‌وری با ضریب شکست ۱/۵۷ (شکل سمت راست). در این نمودار از عدسی شیئی با طول لوله مکانیکی نامحدود استفاده شده است. محدوده خطا در شکل نشان‌دهنده ۵ بار داده‌گیری در هر عمق است.	۱۳.۳
۸۰	نتایج روغن غوطه‌وری با ضریب شکست ۱/۵۱ برای ذره ۴/۴ میکرون (a)، ۴/۲ میکرون (b)، ۳/۸ میکرون (c)، ۴ میکرون (d). محدوده خطا در شکل نشان‌دهنده ۳ بار داده‌گیری در هر عمق است.	۱۴.۳
۸۱	نتایج روغن غوطه‌وری با ضریب شکست ۱/۵۳ برای ذره ۵ میکرون (a)، ۳/۶ میکرون (b)، ۴/۸ میکرون (c)، ۴ میکرون (d)، ۴ میکرون (e). محدوده خطا در شکل نشان‌دهنده ۳ بار داده‌گیری در هر عمق است.	۱۵.۳

- ۱۶.۳ نتایج روغن غوطه‌وری با ضریب شکست $1/55$ برای ذره $3/6$ میکرون (a)، $4/2$ میکرون (b)، $3/8$ میکرون (c)، $4/2$ میکرون (d)، $4/4$ میکرون (e). محدوده خطا در شکل نشان‌دهنده ۳ بار داده‌گیری در هر عمق است. ۸۲
- ۱۷.۳ نتایج روغن غوطه‌وری با ضریب شکست $1/57$ برای ذره $4/2$ میکرون (a,b)، $4/4$ میکرون (c)، $5/4$ میکرون (d)، 4 میکرون (e). محدوده خطا در شکل نشان‌دهنده ۳ بار داده‌گیری در هر عمق است. ۸۳
- ۱۸.۳ نتایج روغن غوطه‌وری با ضریب شکست $1/59$ برای ذره $5/6$ میکرون (a,d,e)، $4/8$ میکرون (b)، 5 میکرون (c). محدوده خطا در شکل نشان‌دهنده ۳ بار داده‌گیری در هر عمق است. ۸۴
- ۱۹.۳ نتایج روغن غوطه‌وری با ضریب شکست $1/63$ برای ذره 5 میکرون (شکل سمت چپ) و ذره $5/5$ میکرون (شکل سمت راست). محدوده خطا در شکل نشان‌دهنده ۵ بار داده‌گیری در هر عمق است. ۸۵
- ۲۰.۳ نتایج روغن غوطه‌وری با ضریب شکست $1/51$ برای ذره 5 میکرون (شکل سمت چپ) و ذره $4/8$ میکرون (شکل سمت راست). محدوده خطا در شکل نشان‌دهنده ۵ بار داده‌گیری در هر عمق است. ۸۶
- ۲۱.۳ فرکانس گوشه بر حسب عمق برای روغن غوطه‌وری با ضریب شکست $1/518$. شکل سمت چپ برای قطره $3/3$ میکرونی محلول آب نمک و شکل سمت راست برای میکروکره سیلیکا به قطر $3/01$ میکرون است. محدوده خطا در شکل نشان‌دهنده ۵ بار داده‌گیری در هر عمق است. ۸۷
- ۲۲.۳ فرکانس گوشه در راستای محور z بر حسب عمق تله برای ذرات به قطر تقریبی 4 میکرون و روغن‌های غوطه‌وری مختلف در توان لیزر 22 میلی‌وات. در هر عمق 3 بار داده گرفته شده است. محدوده خطا به دلیل کوچک بودن دیده نمی‌شود. ۸۸

۲۳.۳ عمق بهینه بر حسب ضریب شکست روغن غوطه‌وری برای ذرات به قطر تقریبی ۴

میکرون. با برازش یک منحنی خطی بر این داده‌ها، پارامترهای این منحنی در نمودار

فوق نشان داده شده‌اند. ۸۹

فصل اول

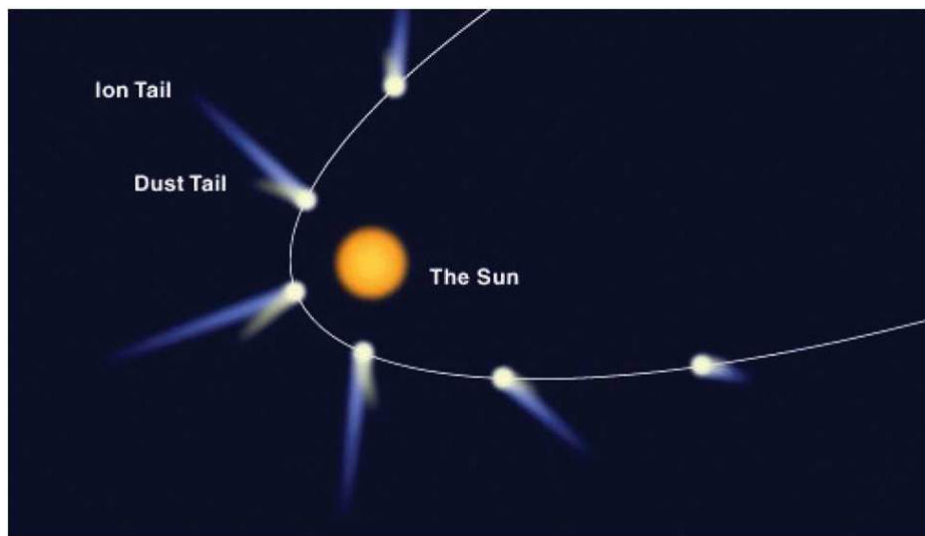
انبرک نوری

از زمان ابداع و کاربرد انبرک نوری^۱ کمتر از ۳۰ سال می‌گذرد و در این مدت این وسیله در حوزه‌های مختلف علوم تجربی از جمله فیزیک، شیمی، بیوفیزیک، بیوشیمی، زیست، میکروشاره و نانو تکنولوژی مورد استفاده قرار گرفته است. به طور ساده، انبرک نوری باریکه‌ی لیزر کانونی شده توسط یک عدسی شیئی با گشودگی عددی بالا است که قادر به تله‌اندازی ذرات می‌باشد. با استفاده از این وسیله می‌توان نیروهایی از مرتبه‌ی چند صد پیکونیوتن تا چند صد پیکونیوتن، به اجسام میکرومتری و زیر میکرومتری اعمال نمود. ابعاد نور کانونی شده حدود ۱ تا ۳ میکرون است و در این ناحیه گرادیان شدت بسیار بزرگی ایجاد می‌شود. هنگامی که ذره به کانون نزدیک می‌شود، نیرویی متناسب با گرادیان شدت بر آن وارد شده که باعث تله‌اندازی ذره می‌شود. این نیرو برای جابه‌جایی‌های کوچک، شبیه نیروی فنر است و یک چاه پتانسیل سه بعدی تقریباً هماهنگ ایجاد می‌کند.

^۱ Optical tweezers

۱.۱ تاریخچه

در سال ۱۶۱۹ کیپلر مشاهده کرد که دم ستاره‌های دنباله‌دار، که در یک مدار بیضی‌گون به دور خورشید می‌چرخند، همیشه به سمت بیرون مدار و در جهت تابش نور خورشید قرار می‌گیرد (شکل ۱.۱). کیپلر علت این پدیده را فشار تابشی^۱ ناشی از نور خورشید می‌دانست [۲].



●

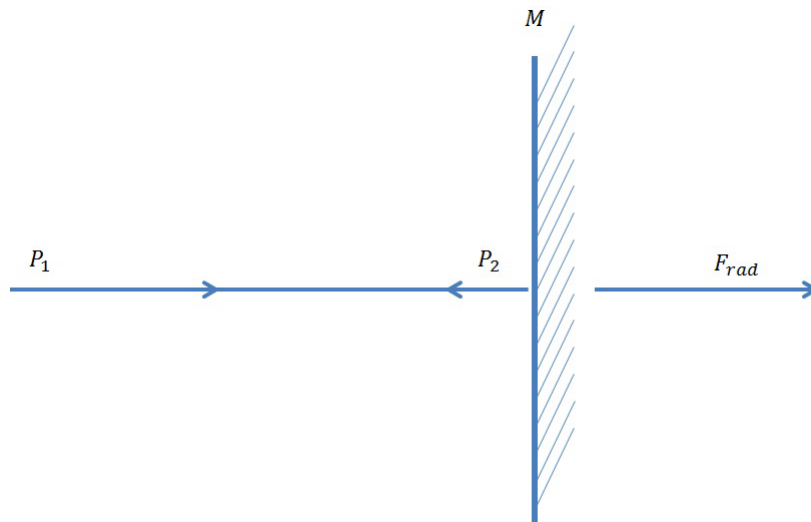
شکل ۱.۱: انحراف دم ستاره دنباله‌دار در عبور از کنار خورشید [۳۵].

یکی از نتایجی که ماکسول هنگام فرمول‌بندی نظریه الکترومغناطیس به دست آورد این بود که موج الکترومغناطیسی (پرتوهای نور) می‌تواند به اجسام نیرو وارد کند و آنها را در امتداد انتشار نور هل دهد. ماکسول در مقاله‌ای که در سال ۱۸۷۳ منتشر شد، بیان کرد که: در محیطی که امواج الکترومغناطیسی منتشر می‌شوند همواره فشاری در جهت عمود بر جبهه‌ی موج وجود دارد که از لحاظ عددی برابر با

^۱ Radiation pressure

انرژی در واحد حجم است [۸].

لبدف^۱ فیزیک‌دان روسی در سال ۱۹۰۱، برای اولین بار بطور تجربی وجود فشار تابشی را مشاهده کرد [۹]. وی با کانونی کردن نور یک لامپ قوس الکتریکی بر سطح یک ورقه‌ی نازک پلاتینیوم به



شکل ۲.۱: تابش پرتو نور با تکانه p بر سطح یک آینه بازتابنده کامل.

ضخامت $۰/۰۲$ میلی‌متر که از یک رشته قابل انعطاف آویزان بود، مشاهده کرد که با روشن کردن لامپ، ورقه نسبت به حالت تعادل خود مقداری می‌چرخد. با محاسبه‌ی مقدار چرخش ورقه نسبت به حالت قبل از روشن شدن لامپ، مقدار نیروی تابشی وارد بر آن را به دست آورد.

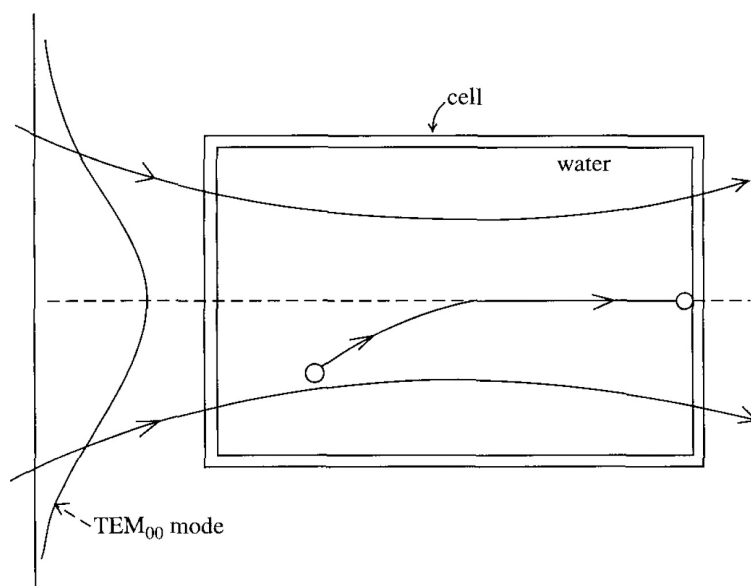
پس از آن با ظهور مکانیک کوانتومی، نور به صورت بسته‌های فوتون در نظر گرفته شد و تکانه‌ی هر فوتون از رابطه زیر محاسبه شد:

$$p = E/c = h\nu/c = h/c \quad (۱.۱)$$

که ν بسامد نور، λ طول موج نور، c سرعت نور و h ثابت پلانک است. هنگام برخورد فوتون‌ها به اجسام، این تکانه می‌تواند به اجسام منتقل، و به آنها نیرو وارد کند. اما آشکارسازی این نیرو به علت

^۱ Lebedev

ضعیف بودن آن، به آسانی امکان پذیر نیست. برای مثال فشاری که نور خورشید در یک ظهر آفتابی بر سطح یک بازتابنده‌ی کامل در سطح زمین وارد می‌کند برابر با $۴,۷ \times ۱۰^{-۶} N/m^2$ است. بنابراین با منابع نور طبیعی نمی‌توان اثرات فشار تابشی را مشاهده کرد.



شکل ۳.۱: باریکه لیزر ذره را به جلو و متمایل به محور باریکه حرکت می‌دهد. پس از قرار گرفتن روی محور باریکه ذره به حرکت خود ادامه داده تا به دیواره مقابل برسد [۱۳].

با اختراع لیزر در سال ۱۹۶۰ که یک منبع نور با توان بالا است اثرات فشار تابشی راحت تر مشاهده شد. آرتور اشکین^۱ اولین کسی بود که با انجام آزمایش‌های مختلف انبرک نوری را معرفی و طراحی نمود. اشکین که مدت‌ها قبل از اختراع لیزر به آشکارسازی فشار تابشی می‌پرداخت، ابتدا سعی کرد با ملاحظات نیمه کلاسیکی، تخمینی از اندازه‌ی این نیرو به دست آورد [۱۰]. برای این منظور یک باریکه نور ناهمدوس با توان P به طور عمودی بر یک آینه تخت تاباند (شکل ۲.۱). در نتیجه باریکه بازتابی در جهت عکس باریکه اولیه منتشر شده و تکانه هر فوتون بعد از بازتاب از آینه به اندازه $2h\nu/c$ تغییر می‌کند. تعداد فوتون‌هایی که در واحد زمان به آینه برخورد می‌کنند $P/h\nu$ است. بنابراین تغییر تکانه باریکه فرودی در واحد زمان $2P/h\nu$ می‌شود. طبق اصل پایستگی تکانه، تغییر تکانه آینه با تغییر تکانه

^۱ Arthur Ashkin