بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران مرکزی

دانشکده: علوم پایه، **گروه:** فیزیک

پایان‌نامه برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد (M.Sc)

گرایش: اتمی مولکولی

عنوان:

تله‌اندازی ذرات میکرونی توسط انبرک نوری

استاد راهنما:

دکتر حمیدرضا شیروانی مهدوی

استاد مشاور:

دکتر سید نادر سید ریحانی

پژوهشگر:

نعیمه پورصفا

تابستان ۱۳۹۱

بسمه تعالی

تعهدنامه اصالت پایان نامه کارشناسی ارشد

اینجـانب نعیمه پورصفا دانشـجوی کارشـناسی ارشـد رشـته فیزیـک گرایش اتمی مولکولی با شـماره دانشـجویی ۸۸۰۸۳۸۲۲۷۰۰ اعلام می نمایم که کلیه مطالب منـدرج در این پایان نامـه با عنوان: تله‌اندازی ذرات میکرونی توسط انبرک نوری

حاصل کار پژوهشی خود بوده وچنانچه دستاوردهای پژوهشی دیگران را مورد استفاده قرار داده باشم، طبق ضوابط و رویه های جاری، آن را ارجاع داده و در فهرست منابع و مآخذ ذکر نموده ام. علاوه بر آن تاکید مینماید که این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح، با این طرح یا بالاتر ارائه نشده و چنانچه در هر زمان خلاف آن ثابت شود، بدینوسیله متعهد می شوم، در صورت ابطال مدرک تحصیلی ام توسط دانشگاه، بدون کوچکترین اعتراض آنرا بپذیرم.

تاریخ و امضاء

بسمه تعالی

در تاریخ:

دانشجوی کارشناسی ارشد آقای/ خانم از پایان نامه خود دفاع نموده و با

نمره بحروف و با درجه

مورد تصویب قرار گرفت.

امضاء استاد راهنما

تقدیم به:

پدر و مادر مهربان

و

برادر عزیزم

تشکر و قدردانی:

حمد و سپاس خداوند یکتا را که آگاه ساخت ما را بر بی‌آگاهی خویشتن و سپس آموختِمان، آموختن را...

و نهایت سپاس من نثار عزیزانی که به من مجال آموختن دادند، نه تنها علم را بلکه گفتار و کردار و پندار شایسته عالم را.

از استاد ارجمند و بزرگوار جناب آقای دکتر حمید رضا شیروانی مهدوی صمیمانه تشکر و سپاسگزاری می‌نمایم که ایشان همواره با صبر و بردباری راهنما و پاسخ‌گوی من بودند و هم‌چنین از جناب آقای دکتر سید نادر سید ریحانی استاد مشاور اینجانب به‌خاطر راهنمایی‌های علمی ایشان در پیشبرد اهداف خود در این پروژه نیز بسیار تشکر و قدردانی می‌نمایم.

در نهایت برای کلیه دوستانی که به هر نحو اینجانب را در تهیه و ارائه این پایان نامه یاری نمودند توفیق روز افزون خواستارم.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول: مقدمه- تاریخچه‌ی نور و تله‌اندازی نوری ۲

فصل دوم: بررسی و مطالعه‌ی نظری انبرک‌های نوری

۲-۱ مقدمه ۱۵

۲-۲ تئوری (روش‌های نظری برای مطالعه‌ی انبرک نوری) ۲۰

۲-۲-۱ یادآوری برخی کمیت‌ها ۲۰

۲-۲-۲ فیزیک تله‌ی نوری ۲۳

۲-۲-۳ اپتیک هندسی ۲۵

۲-۲-٤ سازگان ریلی ۳٤

۲-۲-۵ سازگان می ۳۹

۲-۲-۵-۱ بررسی پایستگی تکانه‌ی‌خطی و تانسور تنش ماکسول ٤۰

فصل سوم: مطالعه تجربی انبرک نوری

۳-۱ چیدمان انبرک نوری ٤۵

۳-۲ اهمیت و شرایط انتخاب اجزای انبرک نوری ٤٦

۳-۲-۱ لیزر ٤٦

۳-۲-۱-۱ محاسبات مربوط به قطر باریکه‌ی گوسی بعد از عبور از عدسی (اندازه‌ی لکه‌ی کانونی کمینه برای یک عدسی) ٤۹

۳-۲-۲ شیئی میکروسکوپ ۵۱

۳-۲-۲-۱ عمق میدان ۵۲

۳-۲-۲-۲ فاصله‌ی کاری ۵٦

۳-۲-۲-۳ ضخامت شیشه‌ی لامل شئی میکروسکوپ ۵۷

۳-۳ انواع ابیراهی ۵۸
۳-۳-۱ ابیراهی کروی ۵۹
۳-۳-۲ ابیراهی کما ۵۹
۳-۳-۳ ابیراهی آستیگماتیسم ۶۰
۳-۳-٤ ابیراهی انحنای میدان ۶۰
۳-۳-۵ ابیراهی اعوجاج یا واپیچش نور ۶۱
۳-٤ کنترل و بهینه‌سازی ابیراهی‌ها در دستگاه‌های نوری ۶۲
۳-۵ دیگر اجزای انبرک نوری ۶۲
۳-۵-۱ چگالنده ۶۲
۳-۵-۲ پهن‌کننده‌ی نور ۶۳
۳-۵-۳ تقسیم‌کننده‌ی باریکه ۶٤
۳-۵-٤ آینه‌های ٤۵درجه ۶٤
۳-۵-۵ لامپ رشته‌ای مات ۶۵
۳-۵-۶ CCD مدل DCU224 ..... ۶۵
۳-۶ آماده سازی نمونه ۶۶
۳-۷ چیدمان انبرک نوری در آزمایشگاه ۶۷
۳-۸ یادآوری ۷۱

فصل چهارم: نتیجه‌گیری ۷۳

پیوست الف: مختصری از کاربرد انبرک نوری در اکتین‌ها و میوزین‌ها ۸۰
پیوست ب: فشار تابش ۸۲
پیوست ج: محاسبه‌ی $\vec{F}_z$ و $\vec{F}_y$ بدون رفتن به صفحه‌ی مختلط ۸٤
پیوست د: فاصله‌ی کانونی پشتی ۸۸

واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی ۸۹
واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی ۹۳

مراجع و منابع ۹۷

فهرست نمودارها

عنوان صفحه

نمودار ۱-۱: تعداد مقاله‌های چاپ‌شده از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۱ ..... ۱۲

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل۱-۱: اولین مشاهده از حرکت ذره توسط نیروی فشار تابش بر روی کره‌های میکرونی شفاف پلی‌استایرن ۲/۵ میکرونی در آب [۱]..... ٤
شکل۱-۲: مشاهده‌ی اولین تله‌اندازی با دو باریکه‌ی گوسی که به طور متقارن در نقطه E به تعادل رسیدند. جابه‌جایی ذره به 'E یا "E در نتیجه نیروی بازگرداننده [۱]..... ۵
شکل۱-۳: تله شناوری [۲]..... ۵
شکل۱-٤: نوعی از آزمایش زیست شیمیایی. انتهای مولکول DNA که به ذره پلی‌استایرن وصل شده است به‌طوری‌که توسط انبرک نوری تله و حرکت داده می‌شود [٤]..... ۷
شکل۱-۵: آزمایش مشاهده شده روی مولکول‌های منفرد و رشته‌های اکتین که بر روی یک مولکول منفرد میوزین قرار گرفته‌اند. انتهای رشته‌ها به ذره‌ی پلی‌استایرن الحاق شده است [۹]..... ۹
شکل۱-٦: اولین کاربرد انبرک نوری بر روی موتور DNA و پلی‌مر RNA [۱۱]..... ۱۰
شکل۲-۱: برهم‌کنش نور با یک ذره کلوییدی، به علت یک نیروی بازگرداننده ذره به ناحیه ای با گرادیان شدت بالاتر کشیده می‌شود [۲۹]..... ۱۸
شکل۲-۲: سرچشمه‌ی نیروی پراکندگی و گرادیانی [۲]..... ۱۹
شکل۲-۳: پارامتر هم‌کانون و کمر پرتو..... ۲۱
شکل۲-٤: پخش یک مد TEM_{00} [۳۰]..... ۲۲
شکل۲-۵: نیروهای نوری وارد بر یک ذره. نیروی پراکندگی به رنگ قرمز و نیروی گرادیانی به رنگ آبی [۳۱]..... ۲٤
شکل۲-٦: ابعاد ذره نسبت به طول‌موج در اپتیک هندسی..... ۲۵
شکل۲-۷: تغییر تکانه‌ی یک باریکه در اثر برخورد با یک ذره..... ۲٦
شکل۲-۸: چگونگی عملکرد تله‌ی نوری تک باریکه‌ای- انبرک نوری- همواره نیرویی به سمت، محلی با شدت بیشتر به جسم وارد می‌شود [۳۲]..... ۲٦

شکل۲-۹: (A) طرح هندسی مربوط به محاسبه‌ی نیروهای تله‌ی ناشی از تک‌باریکه‌ی گرادیانی در سازگان هندسی، وقتی که کانون در امتداد محور zها و به فاصله‌ی s از مرکز کره قرار دارد. (B)طرح مربوط به یک تک‌پرتو از باریکه (فرودی به کانونf) در ایجاد نیروی پراکندگی و گرادیانی [۳۲]..... ۲۷

شکل۲-۱۰: پرتوی شکسته و بازتابیده در مدل هندسی [۳۲]..... ۲۸

شکل۲-۱۱: نمودار نوعی بازده‌ی تله در جهت محوری، محور عمودی شعاع ذره بهنجار شده است. Q_S مربوطبه نیروی پراکندگی، Q_g مربوط به نیروی گرادیانی، Q_t نیروی کل است [۳۲]..... ۳۳

شکل۲-۱۲: ابعاد ذره نسبت به طول‌موج در سازگان ریلی..... ۳٤

شکل۲-۱۳: دستگاه مختصات فرود و پراکندگی [۳۵]..... ۳٤

شکل۳-۱: طرح شماتیک چیدمان انبرک نوری مورد استفاده..... ٤٦

شکل۳-۲: پروفایل توزیع شدت باریکه‌ی گوسی با مد عرضی TEM_{00} [۳۹]..... ٤۷

شکل۳-۳: سطح مقطع مد عرضی TEM_{00}، هرمیت گوس و لاگر-گوس [٤۰]..... ٤۸

شکل۳-٤: پروفایل توزیع شدت باریکه‌ی گوسی مد TEM_{00}، لاگر-گوس و مد مرتبه‌ی بالاتر به همراه شکل سطح مقطع [٤۱]..... ٤۸

شکل۳-۵: کانونی شدن یک باریکه‌ی گوسی به‌وسیله‌ی یک عدسی [۳۰]..... ٤۹

شکل۳-٦: شیئی میکروسکوپ..... ۵۱

شکل۳-۷: فاصله‌ی کانونی پشتی شئی میکروسکوپ [٤۲]..... ۵۲

شکل۳-۸: گشودگی‌عددی [٤۱]..... ۵۲

شکل۳-۹: گشودگی عددی و ابعاد دایره‌های تشکیل شده، با افزایش گشودگی عددی شدت تیزتر و ابعاد دایره‌ها کوچک‌تر می‌شود [٤۱]..... ۵۳

شکل۳-۱۰: اندازه‌ی لکه کانونی و NA [٤۱]..... ۵٤

شکل۳-۱۱: (a) عدسی شیئی غوطه‌ور در آب و عدم انطباق ضریب‌شکست محیط غوطه‌وری. (b) عدسی شیئی غوطه‌ور در روغن [٤۳]..... ۵٦

شکل۳-۱۲: ابیراهی کروی [٤٤]..... ۵۹

شکل۳-۱۳: ابیراهی کما [٤٤] ٦٠
شکل۳-۱٤: ابیراهی آستیگماتیسم [٤٤] ٦٠
شکل۳-۱٥: ابیراهی انحنای میدان [٤٤] ٦١
شکل۳-۱٦: ابیراهی اعوجاج یا واپیچش نور [٤٤] ٦١
شکل۳-۱۷: چگالنده ٦٣
شکل۳-۱۸: پهن‌کننده‌ی نور [٤٤] ٦٤
شکل۳-۱۹: تقسیم‌کننده‌ی باریکه [٤٥] ٦٤
شکل۳-۲۰: آینه‌ی 45^{o} [٤٥] ٦٤
شکل۳-۲۱: لامپ رشته‌ای مات ٦٥
شکل۳-۲۲: CCD و صفحه‌ی تنظیم [٤٥] ٦٦
شکل۳-۲۳: ساختار ذره‌ی پلی‌استایرن [٤٦] ٦٦
شکل۳-۲٤: شیشه‌ی حاوی نمونه و نمونه‌های آماده شده در لام و لامل ٦٧
شکل۳-۲٥: نگهدارنده‌ی پلکسی گلس و نمونه‌ای که روی آن قرار گرفته است ٦٨
شکل۳-۲٦: : قسمتی از چیدمان انبرک نوری ٧٠
شکل٤-۱: ایسته‌ی XYZ ٧٦
شکل‌ب-۱: محور مختصات مربوط به میدان و راستای انتشار نور ٨٢

چکیده:

انبرک‌های نوری تله‌های نوری هستند که در آن‌ها با استفاده از لیزر، تله‌اندازی و دست‌کاری ذراتی در ابعاد نانومتر تا میکرومتر انجام می‌شود. برای این منظور نیروهایی در گستره‌ی ۱۰۰-۱۰ پیکونیوتن مورد نیاز است. در این روش فیزیک نیروهای نوری در اثر پراکندگی نور ایجاد شده از سطح ذرات مورد بررسی قرار می‌گیرد. باریکه‌ی نور لیزر به شدت کانونی شده‌ای برای تله‌اندازی ذرات مورد نظر استفاده می‌شود. در واقع تله‌اندازی در راستای محور نوری صورت می‌گیرد و ذره به نقطه‌ی کانونی باریکه منحصر می‌شود (انبرک نوری باریکه‌ی لیزری است که توسط یک عدسی شیئی میکروسکوپ با گشودگی عددی بالا کانونی شده است). به‌وسیله‌ی انبرک‌های نوری می‌توان ذراتی مانند: اتم‌ها، مولکول‌ها، سلول‌های بیولوژیکی، کره‌های کوچک دی‌الکتریک و حتی ذره‌های فلزی را تله‌اندازی و دست‌کاری کرد.

ذره‌ها در ابعاد میکرونی به‌وسیله‌ی لیزر موج پیوسته‌ای که طول‌موج آن در ناحیه‌ی جذب ذره قرار ندارد شتاب می‌گیرند و در یک چاه پتانسیل نوری پایدار در اثر فشار تابش به تله می‌افتند.

با توجه به کاربردهای مختلف انبرک‌های نوری در پزشکی، فیزیک، شیمی و ... در این پایان‌نامه ضمن ایجاد یک انبرک نوری تک‌باریکه، ابزار و قطعات به‌کار رفته در آن و تله‌اندازی ذره ۳/۰۹ میکرونی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

هم‌چنین جهت بهینه‌سازی تله‌اندازی، عوامل مؤثر در افزایش پایداری به‌طور کیفی مورد بررسی قرار می‌گیرد. براساس نتایج تجربی و نظری هرچه پایداری در قطعات به‌کار رفته بیش‌تر باشد، تله‌اندازی پایدارتر خواهد بود.

کلید واژه: انبرک نوری، تله‌اندازی، دست‌کاری، عدسی شیئی میکروسکوپ، گشودگی عددی

فصل اول:

مقدمه – تاریخچه‌ی نور و تله‌اندازی نوری

در نیمه‌ی اول قرن هفدهم یوهانس کپلر[1] برای نخستین بار فرضیه‌ای پیشنهاد کرد که بر اساس آن علت حرکت دُم یک ستاره دنباله‌دار به طرف دور از خورشید وجود نیرویی است که از طرف خورشید بر ذرات آن وارد می‌شود.

در سال ۱۸۷۳ جیمز کلارک ماکسول[2] در نظریه‌ی الکترومغناطیسی خود به طور نظری وجود فشار تابشی حاصل از نور را پیش‌بینی کرد (شار تکانه در باریکه‌ی نور متناسب با شدت نور است و می‌تواند به اجسام منتقل شده و منجر به فشار تابشی و هل دادن آن‌ها در امتداد انتشار نور شود) .

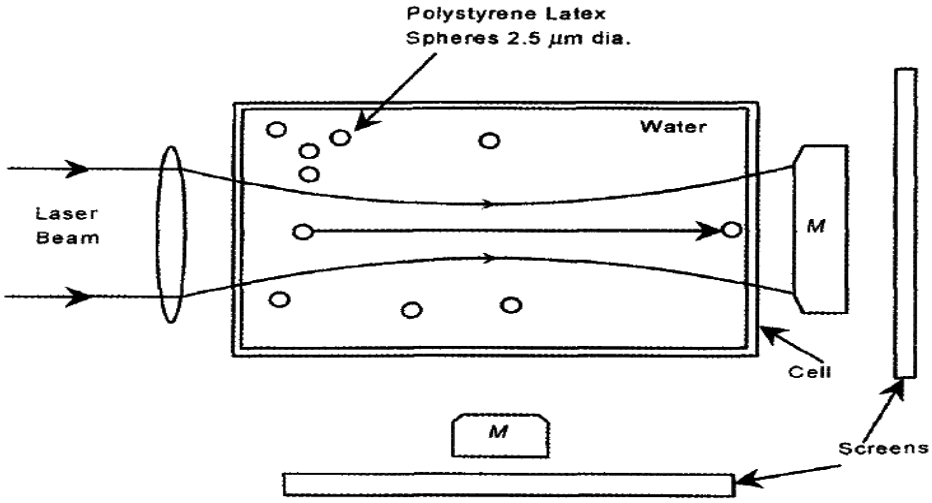
این نظریه سال‌ها بدون اثبات تجربی باقی ماند.

در سال ۱۹۰۱ نیکلز[3] و هال[4] برای اولین بار به‌طور تجربی وجود این فشار تابشی را توسط رادیو-متر در آزمایشگاه ثابت کردند، و لبدو[5] اولین کسی بود که نیروی فشار تابش را اندازه گرفت.

در سال ۱۹۰۸ می[6] مساله‌ی پراش یک موج تخت را روی یک ذره‌ی کروی حل کرد. تا اینکه در سال ۱۹۶۰ مایمن[7] اولین لیزر را ساخت. توان زیاد نور لیزر نسبت به منابع نور معمولی سبب شد تا لیزر به-عنوان چشمه‌ی منحصر به‌فرد نور قوی همدوس شناخته شود و فشار تابشی ایجاد شده از طریق آن قابل آشکارسازی شود و کاربردهای لیزر در شاخه‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد.

1 kepler
2 Maxwell
3 Nichols
4 Hlall
5 Lebedev
6 Mie
7 Maiman

اواخر سال ۱۹۶۹ آرتور اشکین[1] به منظور محاسبه‌ی بزرگی نیروی فشار تابشی، آزمایش ساده‌ای برای مشاهده‌ی حرکت کره‌های شیشه‌ای میکرونی با فشار تابشی باریکه‌ی لیزر با مد عرضی TEM_{00}، ترتیب داد و در جریان آزمایش متوجه شد که ذرات، علاوه بر شتاب گرفتن در جهت انتشار نور لیزر که ناشی از فشار تابشی بود، در جهت عرضی نیز به طرف محور باریکه‌ی لیزر، جایی که شدت باریکه بیشینه است کشیده می‌شوند. هم‌چنین طی آزمایش دیگری نشان داد که حباب‌های هوا در داخل گلیسیرین[2] که ضریب‌شکست کمتری نسبت به محیط اطرافشان دارند، علاوه بر شتاب گرفتن در جهت باریکه‌ی لیزر، درجهت عرضی نیز از محور باریکه دور می‌شوند.

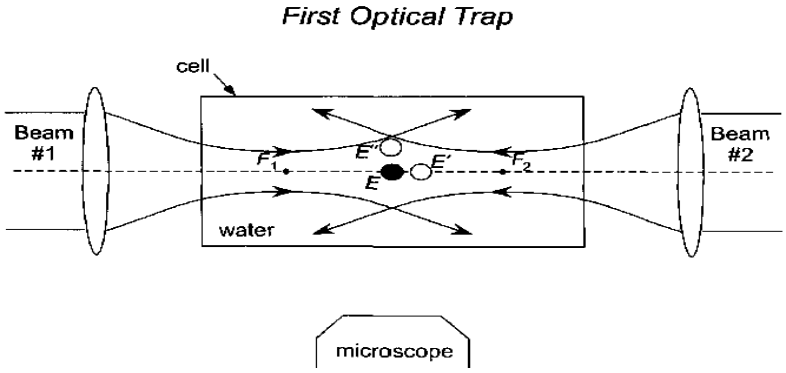


شکل۱-۱: اولین مشاهده از حرکت ذره توسط نیروی فشار تابش بر
روی کره‌های میکرونی شفاف پلی‌استایرن ۲/۵ میکرونی در آب [۱].

اشکین در سال ۱۹۷۰، با استفاده از دو باریکه‌ی لیزری مشابه و در خلاف جهت یکدیگر توانست کره‌های لاتکس در ابعاد میکرونی را در سه بعد به تله بیاندازد. در این آزمایش طبق شکل زیر وقتی کره‌ی میکرونی بر روی محور مشترک باریکه‌ی لیزر قرار گیرد، نیروی پراکندگی ناشی از دو باریکه، از

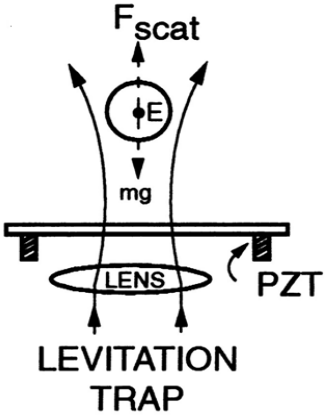
1 Arthur Ashkin
2 Glycerol

آن‌جایی که در خلاف جهت یکدیگر هستند هم‌دیگر را حذف می‌کنند و نیروی گرادیانی باریکه‌ها موجب ماندن کره بر روی محور مشترک باریکه‌ها می‌شود.



شکل ۱-۲: مشاهده‌ی اولین تله‌اندازی با دو باریکه‌ی گوسی که به طور متقارن در نقطه E به تعادل رسیدند.جا به‌جایی ذره به 'Eیا "E در نتیجه نیروی بازگرداننده [۱].

و حتی توانست این ذرات پلی‌استایرن چند میکرومتری که در راستای قایم و رو به بالا کانونی شده بود را در هوا و هم در خلأ به حالت شناور (تعلیق) درآورد (تله‌اندازی ذرات با تکیه بر تعادل بین فشار تابشی، نیروی پراکندگی به سمت بالا و گرانش (وزن کره) به سمت پایین باعث به تعادل درآمدن و شناور ماندن کره در راستای محوری می‌شد) [۲].



شکل۱-۳: تله شناوری [۲]

اشکین در سال ۱۹۸٦ پیشنهاد کرد که یک تک‌باریکه‌ی لیزر به شدت کانونی‌شده می‌تواند یک ذره را بدون حضور گرانش به تله بیندازد. او و همکارانش استیون چو[۱]، جان جورخلم[۲]، جوزف زیدزیک[۳] در آزمایشگاه بل[٤] (AT & T) در سال ۱۹۸٦ اولین تله‌اندازی را به‌طور تجربی نشان دادند. از آن زمان تا به حال از انبرک نوری به‌منظور تله‌اندازی ذرات دی‌الکتریک در ابعاد چند نانومتر تا چند میکرومتر استفاده شده است.

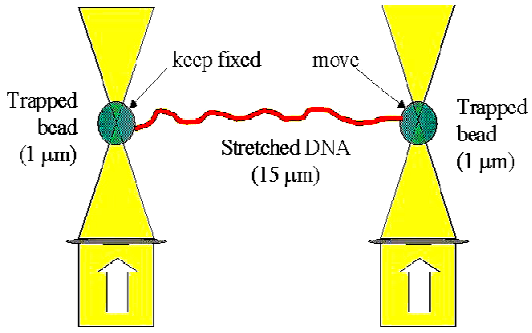
اولین کاربرد انبرک‌های نوری در نمونه‌های بیولوژیکی در کنترل نیروهای داخلی سلول زنده به‌منظور مطالعه‌ی ویژگی‌های مکانیکی سیتوپلاسم سلول‌های گیاهی (خواص کشسانی) توسط اشکین و زیدزیک در سال ۱۹۸۷انجام شد. آن‌ها نشان دادند که می‌توان ذرات زیستی را نیز با انتخاب طول‌موج مناسب با حداقل آسیب‌های ناشی از تابش (با استفاده از لیزر در ناحیه‌ی مادون‌قرمز) تله‌اندازی کرد. برای جابه‌جایی‌های کم از مرکز تله (تا بیشترین مقدار۳۰۰-۱۰۰ نانومتر) انبرک نوری مانند فنر عمل می‌کند که با یک ضریب سختی تله مشخص می‌شود. به‌ازای توانی در حدود چند میلی وات برای لیزر، نیرویی از مرتبه ۱۰۰-۱ پیکو نیوتن ایجاد می‌شود که طبق استانداردهای مرسوم این مقدار نیرو برای مطالعات بیومولکولی مناسب است. برای مثال یک نیروی ۱۰۰ پیکونیوتونی برای تله‌اندازی یک باکتری مانند اشرشیاکلی[٥] کافی است. طبق نظر متا[٦] و همکارانش "هدف نهایی در بیوفیزیک مشخص کردن مکانیسم رفتاری مولکول‌های منفرد می‌باشد".

قبل از پیشرفت انبرک‌های نوری دانشمندان بیوفیزیک بدون دخالت دست قادر به دست‌کاری مولکول‌ها نبودند. در واقع آنها رفتار انبوهی از مولکول‌های بزرگ را بررسی کردند و با تکنیک‌های مختلف به رفتار مولکول‌های منفرد پی‌بردند.

---

[1] Steven Chu
[2] John Bjorkholm
[3] Joseph Dziedzic
[4] Bell
[5] E Coli
[6] Metha

انبرک نوری روش بسیار مناسبی برای مطالعه‌ی ویژگی‌های مولکول‌های منفرد می‌باشد. با توجه به اینکه مولکول‌های بیولوژیکی آنقدر کوچک‌اند که در دمای اتاق تله‌اندازی می‌شوند، یک مولکول با استفاده از روش دست‌گیره[1] (روش تله‌اندازی با استفاده از الحاق ذرات ریز به ذرات درشت) که روشی زیست شیمیایی[2] است به یک ذره الحاق می‌شود. اولین کاربرد انبرک‌ها در یک موتور پروتئینی به نام کنیسین[3] در سال ۱۹۹۰ توسط بلاک[4] و همکارانش صورت گرفت [۳].



شکل۱-٤: نوعی از آزمایش زیست شیمیایی.انتهای ملکول DNA که به ذره پلی‌استایرن وصل شده است به‌طوری‌که توسط انبرک نوری تله و حرکت داده می‌شود[٤].

در سال ۱۹۹۲ اولین دستگاه تله‌های چندتایی که در آن نور لیزر با استفاده از ویژگی قطبیدگی نور به دو قسمت تقسیم می‌شود توسط می‌ساوا[5] و همکارانش ساخته شد. بدین‌ترتیب یک تله‌ی چند-باریکه‌ای[6] لیزری برای تله‌اندازی و دست‌کاری چند میکروذره طراحی شد و هم‌چنین باعث القای واکنش فوتوشیمیایی در ذره‌ی به تله افتاده می‌شد، در طی آن آزمایش‌های جالبی همراه با کندگی لیزری و همجوشی لیزری[7] در مورد کره‌های پلاستیکی پلی‌مر[8] با استفاده از تکنیک دست‌کاری نوری صورت صورت گرفت و متوجه شدند که آن‌ها می‌توانند حفره‌های کوچکی در این ذرات کوچک ایجاد کنند و

[1] Handle technique
[2] Biochemically
[3] Kinesin
[4] S. M. Block
[5] Misava
[6] Multi Beam
[7] Laser Fusing
[8] Polymer