

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش اتمی مولکولی

طراحی و برپایی یک آینه همیوگ فازی بر اساس پراکندگی بریلوئن القایی

استاد راهنما:

دکتر محمود سلطان‌الکتابی

استاد مشاور:

مهندس محسن رضانی

پژوهشگر:

زهرا کامرانی

مهر ماه ۱۳۹۰

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات
و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه
متعلق به دانشگاه اصفهان است.







دانشگاه اصفهان
دانشکده علوم
گروه فیزیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش اتمی مولکولی
خانم زهرا کامرانی تحت عنوان

طراحی و برپایی یک آینه همیوغ فازی بر اساس پراکندگی بریلوئن القایی

در تاریخ ۱۳۹۰/۷/۱۱ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه به تصویب نهایی رسید.

- | | | | |
|---|--------------------------|-------------------------|------|
|  | دکتر محمود سلطان‌الکتابی | با مرتبه‌ی علمی استاد | امضا |
|  | مهندس محسن رضائی | با مرتبه‌ی علمی مربی | امضا |
|  | دکتر حمیدرضا فلاح | با مرتبه‌ی علمی دانشیار | امضا |
|  | دکتر حمید لطیفی | با مرتبه‌ی علمی استاد | امضا |

گروه فیزیک
امضای مدیر گروه


سپاسگزاری

شکر خداوند متعال را به جای آورده که توفیق نصیب من کرد تا این پایان نامه را به پایان رسانم.

از پدر گرامی و مادر مهربانم شکر و قدردانی می‌کنم به خاطر تمام زحماتی که در دوران پر فراز و نشیب زندگی‌م تحمل شدند. نگاه‌های پدر و مادرم، با چشم‌های پر از برق شوق، حسنگی این راه را به امید و روشنی راه تبدیل کرده است. امیدوارم بتوانم جوایمی این همه محبت آن‌هاشم.

از همسر عزیزم بسیار سپاسگزارم چرا که آرامش روحی و آسایش فکری مرا فراهم نمود تا با حمایت‌های همه‌جانبه در محیطی مطلوب، مقطع کارشناسی ارشد را به نحو احسن به اتمام رسانم.

با تقدیر و قدردانی از استاد فرهیخته و بزرگوارم جناب پروفیسور محمود سلطان الکتابی که با نکته‌های دلاویز و گفته‌های بلند، صحیفه‌های سخن را علم پرور نمود و به‌ویژه راهنمای بنده در این پایان نامه بوده‌اند.

از مشاور کرامت‌دارم جناب آقای مهندس محسن رمضان‌ی از شرکت صنایع الکترواپتیک اصفهان (صاها) به خاطر راهنمایی‌ها و مساعدت‌های ایشان در تأمین تجهیزات بسیار سپاسگزارم.

و با تقدیر و شکر شایسته از جناب آقای مهندس عبدالصمد طاهری از شرکت صنایع الکترواپتیک اصفهان که با راهنمایی‌ها، دگرگمی‌ها و پشتیبانی‌های دلسوزانه‌شان، بسیاری از سختی‌ها را برابرم آسان‌تر نمودند. از ایشان به دلیل این که آموزه‌های خویش را حال‌صانه به من آموختند سپاسگزارم. به امید پیشرفت هرچه بیشتر برای ایشان در تمامی مراحل زندگی.

زهر اکامرانی

مهرماه ۱۳۹۰

تقدیم به

پدر و مادر مهربان

و

همسر عزیزم

چکیده

در این پژوهش، ابتدا محاسبات موردنیاز به منظور به دست آوردن یک لیزر Nd:YAG تک‌مُد طولی با طول‌موج 1064nm را با استفاده از دو سنج‌ه انجام داده و پارامترهای مؤثر در طراحی آن را مورد تحلیل قرار دادیم. اما به دلیل این‌که این سنج‌ها به دستمان نرسید، نتوانستیم چیدمان آزمایشگاهی آن را برپا کنیم. سپس معادلات دیفرانسیل جفت-شده مربوط به پدیده‌ی پراکندگی بریلوئن القایی در آینه همیوگ فازی (PCM)¹ را به کمک شبیه‌سازی حل نمودیم. یک آینه همیوگ فازی بهینه به ازای انرژی‌های فرودی مختلف با پهنای تپ لیزری 10 ns در طول‌موج 1064 nm با ماده‌ی غیرخطی CS_2 جهت تصحیح جبهه موج پرتو خروجی یک سامانه‌ی نوسانگر-تقویت‌کننده‌ی لیزری طراحی کردیم. مقادیر بهینه‌ی طول سلول و فاصله‌ی کانونی و بازتابندگی این آینه را به دست آوردیم. در ادامه با برپایی چیدمان تجربی، تأثیر آن را بر روی عملکرد یک سامانه‌ی نوسانگر-تقویت‌کننده‌ی دو بار عبور لیزر نئودمیوم-یاگ در حضور PCM بررسی کرده و با سامانه‌ی نوسانگر-تقویت‌کننده‌ی دو بار عبور آینه‌ای مقایسه نمودیم. انرژی خروجی تقویت‌کننده را در دو حالت یک‌بار عبور و دو بار عبور به صورت تجربی به دست آوردیم و تغییرات انرژی خروجی را در این دو پیکربندی مقایسه نمودیم. مشاهده نمودیم که در نسبت‌های انرژی ورودی بالا (در مقایسه با انرژی اشباع)، انرژی خروجی در دو پیکربندی یکسان می‌شود. به کمک این آینه‌ی PCM توانستیم پهنای تپ لیزری را تا $0/7$ مقدار اولیه‌اش کاهش دهیم.

کلید واژه- سنج‌ه، تک‌مُد طولی، پراکندگی بریلوئن القایی، آینه همیوگ فازی

¹ Phase Conjugate Mirror

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱.....	فصل اول: پراکندگی نور خودبه‌خودی.....
۱.....	پیش‌درآمد.....
۲.....	۱-۱ پدیده‌های غیرخطی.....
۳.....	۲-۱ ویژگی‌های پراکندگی نور خودبه‌خودی.....
۵.....	۱-۲-۱ افت‌وخیزها به‌عنوان منشأ پراکندگی نور.....
۶.....	۲-۲-۱ ضریب پراکندگی.....
۷.....	۳-۲-۱ سطح مقطع پراکندگی.....
۹.....	۳-۱ نظریه‌ی میکروسکوپیکی پراکندگی نور.....
۱۵.....	۴-۱ نظریه‌ی ترمودینامیک پراکندگی نرده‌ای نور.....
۱۸.....	۱-۴-۱ پراکندگی نور از گاز آرمانی.....
۱۹.....	۲-۴-۱ بیناب نور پراکنده شده.....
۱۹.....	۳-۴-۱ پراکندگی بریلوئن.....
۲۴.....	۱-۳-۴-۱ پراکندگی استوکس.....
۲۶.....	۲-۳-۴-۱ پراکندگی پاداستوکس.....
۲۸.....	فصل دوم: پراکندگی بریلوئن القایی و همیوغ فازی.....
۲۸.....	پیش‌درآمد.....

۱-۲ الکتروستریکسیون.....	۳۰
۲-۲ پراکندگی بریلوئن القایی (القا شده توسط الکتروستریکسیون).....	۳۵
۳-۲ شرح نظری پدیده‌ی SBS.....	۳۹
۴-۲ ایجاد همیوگ فازی نوری توسط SBS.....	۴۲
۵-۲ ویژگی‌های مواد مورد استفاده برای SBS.....	۴۴
فصل سوم: برخی از روش‌های تک‌مُد طولی کردن لیزر.....	
پیش‌درآمد.....	۴۷
۱-۳ مدهای عرضی.....	۴۸
۱-۱-۳ توزیع شدت.....	۴۸
۲-۱-۳ مشخصه‌های یک پرتو گاوسی.....	۵۰
۳-۱-۳ مدهای مرتبه‌ی بالاتر.....	۵۲
۲-۳ مدهای طولی.....	۵۴
۳-۳ لیزر تک‌مُد طولی.....	۵۵
۱-۳-۳ تک سنجه در کاواک لیزری.....	۵۵
۲-۲-۳ دو سنجه در کاواک لیزری.....	۵۷

فصل چهارم: نتایج نظری و آزمایشگاهی.....	۶۲
پیش‌درآمد.....	۶۲
۱-۴ محاسبات عددی مدل دو بُعدی.....	۶۳
۲-۴ نتایج و تحلیل.....	۶۶
۳-۴ چیدمان آزمایشگاهی.....	۶۸
۴-۴ نتیجه‌گیری.....	۷۵
منابع.....	۷۶

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: پراکندگی نور خودبه‌خودی. (الف) چیدمان آزمایشگاهی. (ب) بیناب مشاهده‌شده‌ی نمونه [۱].....	۳
شکل ۱-۲: پراکندگی نور نمی‌تواند در یک محیط کاملاً همگن رخ دهد.....	۵
شکل ۱-۳: کمیت‌های مورد استفاده برای تعیین ضریب پراکندگی [۱].....	۷
شکل ۱-۴: پراکندگی نور توسط یک مولکول.....	۸
شکل ۱-۵: هندسه‌ی نور پراکنده شده از یک مولکول منفرد [۱].....	۱۰
شکل ۱-۶: وابستگی سطح مقطع پراکندگی به بسامد در یک نوسانگر لورنتزی [۱].....	۱۲
شکل ۱-۷: پراکندگی نور از مجموعه‌ای از مولکول‌ها.....	۱۳
شکل ۱-۸: تصویر پراکندگی بریلوئن استوکس [۱].....	۲۵
شکل ۱-۹: تصویر پراکندگی بریلوئن پاداستوکس [۱].....	۲۶
شکل ۲-۱: پراکندگی بریلوئن القایی [۱].....	۲۸
شکل ۲-۲: (الف) تولیدکننده‌ی SBS؛ (ب) تقویت‌کننده‌ی SBS [۱].....	۲۹
شکل ۲-۳: اساس الکتروستریکسیون (الف) یک قطعه‌ی دی‌الکتریکی واقع شده در نزدیکی یک خازن با صفحات موازی؛ (ب) یک مولکول واقع شده در نزدیکی یک خازن با صفحات موازی [۱].....	۳۱
شکل ۲-۴: خازن غوطه‌ور در یک مایع دی‌الکتریک.....	۳۲
شکل ۲-۵: طرح‌واره‌ای از پراکندگی بریلوئن.....	۳۶
شکل ۲-۶: سلول SBS و ایجاد پراکندگی بریلوئن القایی.....	۴۰

- شکل ۲-۷: مقایسه عملکرد جبهه موج یک آینه‌ی معمولی و یک بازتابنده‌ی همیوگ فازی نسبت به اعوجاج..... ۴۳
- شکل ۳-۱: الگوهای شدت مدهای عرضی استوانه‌ای [۱۶]..... ۴۹
- شکل ۳-۲: الگوهای شدت مدهای عرضی مستطیلی [۱۶]..... ۵۰
- شکل ۳-۳: تصویر یک پرتو گاوسی نزدیک $z=0$ [۱۶]..... ۵۲
- شکل ۳-۴: لیزر تک‌مدی طولی به کمک سنجه درون کاواک [۱۷]..... ۵۶
- شکل ۳-۵: تک‌مد طولی کردن توسط یک سنجه درون کاواکی با ضریب عبوردهی طیفی $T(\nu)$ [۱۷]..... ۵۷
- شکل ۳-۶: تک‌مدی کردن یک لیزر به کمک دو سنجه با گستره‌های طیفی آزاد مختلف در کاواک لیزری [۱۷]..... ۵۸
- شکل ۳-۷: منحنی‌های عبوردهی دو سنجه و کل بر حسب بسامد: الف-مقادیر بهینه بازتابندگی‌ها و ضخامت-های سنجه‌ها، ب-افزایش d_1 و افزایش تعداد مدهای نوسانی و ج-بهینه کردن مقدار d_2 ۵۹
- شکل ۳-۸: افزایش R و کاهش تعداد مدهای نوسانی..... ۶۰
- شکل ۳-۹: الف-کاهش θ از ۳ درجه به ۱ درجه و جابه‌جایی منحنی به سمت بسامدهای پایین‌تر به میزان ۳GH ، ب-افزایش θ از ۳ درجه به ۴ درجه و جابه‌جایی منحنی به سمت بسامدهای بالاتر به میزان ۱GH..... ۶۱
- شکل ۴-۱: شدت‌های I_p و I_s و مساحت پرتو A توابعی از مختصات طولی z هستند [۷]..... ۶۴
- شکل ۴-۲: بازتابندگی زمانی در مکان $z=0$ برای انرژی‌های ورودی مختلف..... ۶۶
- شکل ۴-۳: مقایسه‌ی پهنای زمانی تپ لیزری و تپ استوکس برای انرژی ورودی 50 mJ ۶۷
- شکل ۴-۴: دامنه‌ی موج صوتی در مکان $z=0$ برای انرژی ورودی 50 mJ ۶۸
- شکل ۴-۵: پیکربندی سامانه‌ی نوسانگر-تقویت‌کننده‌ی لیزری با آینه همیوگ فازی..... ۶۹

شکل ۴-۶: (الف) چیدمان برپاشدهی سامانه‌ی نوسانگر-تقویت‌کننده‌ی دو بار عبور لیزر نئودمیوم-یاگ با آینه همیوغ فازی، (ب) آینه همیوغ فازی..... ۷۰

شکل ۴-۷: تغییرات انرژی خروجی نوسانگر در انرژی‌های دمش الکتریکی مختلف..... ۷۳

شکل ۴-۸: تغییرات انرژی خروجی تقویت‌کننده در دو حالت یک بار عبور و دو بار عبور بر حسب انرژی‌های مختلف نوسانگر..... ۷۴

شکل ۴-۹: میزان بازتاب آینه PCM بر حسب انرژی لیزر فرودی..... ۷۴

شکل ۴-۱۰: نمایه‌ی عرضی حاصل از نوسانگر (سمت راست) و بازتاب از تقویت‌کننده‌ی دو بار عبور آینه‌ی (سمت چپ)..... ۷۵

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۴.....	جدول ۱-۱: مقادیر نوعی از پارامترهای توصیف‌کننده‌ی چند پدیده‌ی پراکندگی نور [۱].....
۲۱.....	جدول ۲-۱: سرعت صوت در چند نمونه [۱].....
۴۵.....	جدول ۱-۲: ضرایب بهره‌ی SBS حالت جامد و زمان فروافت آکوستیکی گازها و مایعات بیان شده [۱۶].....
۷۲.....	جدول ۱-۴: مقادیر انرژی خروجی حاصل از سامانه‌ی نوسانگر-تقویت‌کننده در حضور آینه همیوگ فازی و آینه معمولی.....

فصل اول

پراکندگی نور خودبه‌خودی

پیش‌درآمد

وقتی نور با ماده برخورد می‌کند، از آن‌جا که نور دارای میدان الکتریکی و مغناطیسی می‌باشد این میدان‌ها با ماده برهم‌کنش نشان می‌دهند. میدان مهم، میدان الکتریکی است و با الکترون‌ها که در ترکیبات مواد شرکت دارند برهم‌کنش می‌کند. معمولاً این الکترون‌ها هماهنگ با موج نور فرودی نوسان می‌کنند و می‌توانند تأثیر یا تغییر در عبور نور از ماده را به چند طریق انجام دهند:

۱- پراکندگی: نور از مسیر اصلی منحرف می‌شود.

۲- بازتاب: نور پس از برخورد به محیط از آن بازتاب می‌شود.

۳- تراگسیل^۱: نور از ماده با کمترین تغییر شدت عبور می‌کند.

۴- جذب: بخش یا تمامی انرژی موج نور در ماده باقی می‌ماند. مقدار زیادی از انرژی باعث ایجاد حرارت و تغییر خواص در ماده می‌شود.

¹ Transmission

در مبحث پراکندگی نور با ماده با چند نوع پراکندگی روبه‌رو هستیم: پراکندگی رامان، بریلوئن^۱، ریلی و بال ریلی^۲. در این فصل ابتدا پدیده‌های غیرخطی را مطرح، سپس پراکندگی نور خودبه‌خودی را توصیف می‌کنیم.

۱-۱ پدیده‌های غیرخطی

انتشار یک موج درون ماده، باعث تغییرات در قسمت فضایی و زمانی بارهای الکتریکی آن می‌شود و اتم‌ها با میدان‌های الکترومغناطیسی موج برهم‌کنش می‌کنند. اثر عمده‌ی نیروی اعمالی بر ذرات باردار، جابه‌جایی الکترون‌های ظرفیت از مدارهای طبیعی‌شان است. این اختلال، دو قطبی‌های الکتریکی تولید می‌کند که تصویر ماکروسکوپیک آن، قطبش است. شدت میدان‌های الکتریکی کوچک، متناسب با قطبش هستند [۱]. به عبارتی در وضعیت اپتیک خطی، قطبش القا شده به‌طور خطی به شدت میدان الکتریکی وابسته است [۱]:

$$\tilde{P}(t) = \epsilon_0 \chi^{(1)} \tilde{E}(t) \quad (1-1)$$

ثابت تناسب $\chi^{(1)}$ ، پذیرفتاری خطی و ϵ_0 گذردهی خلأ است. علامت (\sim) ، تغییرات سریع نسبت به زمان را نشان می‌دهد.

اگر شدت میدان اعمالی به اندازه‌ی کافی زیاد باشد، قطبش بر حسب مجموعه‌ای از توان‌های شدت میدان الکتریکی است [۱]:

$$\begin{aligned} \tilde{P}(t) &= \epsilon_0 \left[\chi^{(1)} \tilde{E}(t) + \chi^{(2)} \tilde{E}^2(t) + \chi^{(3)} \tilde{E}^3(t) + \dots \right] \\ &\equiv \tilde{P}^{(1)}(t) + \tilde{P}^{(2)}(t) + \tilde{P}^{(3)}(t) + \dots \end{aligned} \quad (2-1)$$

کمیت‌های $\chi^{(2)}$ و $\chi^{(3)}$ به ترتیب پذیرفتاری‌های غیرخطی مرتبه‌ی دوم و سوم است. به‌طور کلی، $\chi^{(1)} \gg \chi^{(2)} \gg \chi^{(3)}$ است و بنابراین در حالت عادی اثرات غیرخطی قابل چشم‌پوشی هستند مگر این‌که شدت میدان الکتریکی خیلی زیاد باشد.

قطبش غیرخطی مرتبه‌ی دوم و $\tilde{P}^{(2)} = \epsilon_0 \chi^{(2)} \tilde{E}^2(t)$ و قطبش غیرخطی مرتبه‌ی سوم $\tilde{P}^{(3)} = \epsilon_0 \chi^{(3)} \tilde{E}^3(t)$ است.

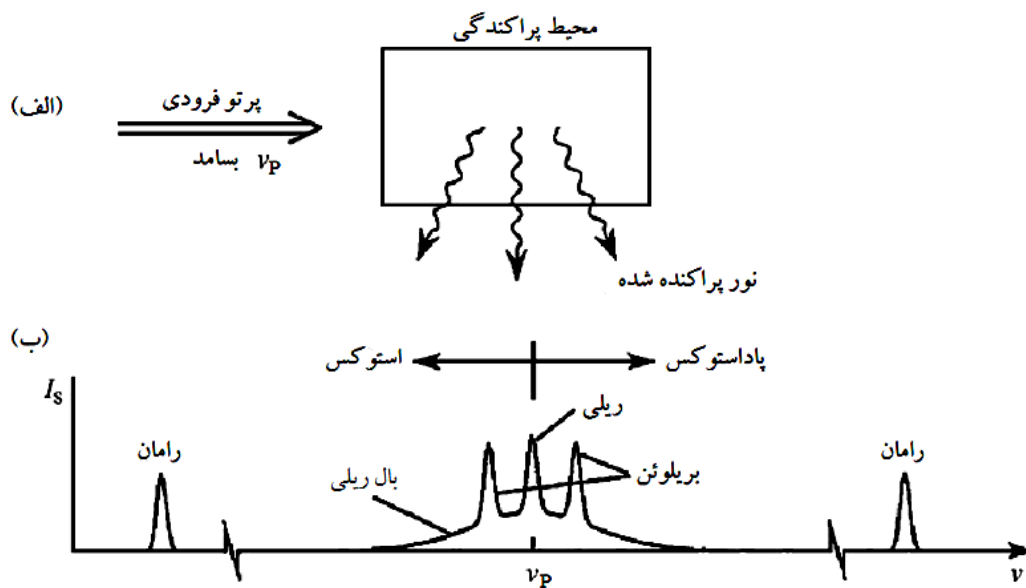
¹ Brillouin

² Rayleigh Wing

از پدیده‌های غیرخطی مرتبه‌ی دوم می‌توان تولید هماهنگ دوم (SHG)^۱، تولید مجموع بسامدی (SFG)^۲ و تولید تفاضل بسامدی (DFG)^۳ را نام برد. پدیده‌های غیرخطی مرتبه‌ی سوم شامل تانسور پذیرفتاری غیرخطی^(۳) است. برای این جمله می‌توان به تولید هماهنگ سوم (THG)^۴، اثر رامان و پراکندگی بریلوئن اشاره کرد.

۲-۱ ویژگی‌های پراکندگی نور خودبه‌خودی

در ابتدا آزمایش پراکندگی نور نشان داده شده در شکل ۱-۱ الف را مطرح می‌کنیم. بیناب نور پراکنده شده، به صورت شکل ۱-۱ ب است که در آن پراکندگی رامان، بریلوئن، ریلی و بال ریلی ارائه شده است. طبق تعریف، مؤلفه‌هایی از نور پراکنده شده که به بسامدهای پایین‌تر جابه‌جا شده‌اند مؤلفه‌های استوکس و مؤلفه‌هایی که به بسامدهای بالاتر جابه‌جا شده‌اند مؤلفه‌های پاداستوکس نامیده می‌شوند. در جدول ۱-۱ بعضی از پدیده‌های فیزیکی را که می‌توانند منجر به پراکندگی نور از ماده شوند و تعدادی از پارامترهای فیزیکی که این پدیده‌ها را توصیف می‌کنند فهرست شده است.



شکل ۱-۱: پراکندگی نور خودبه‌خودی. (الف) چیدمان آزمایشگاهی. (ب) بیناب مشاهده‌شده‌ی نمونه [۱]

^۱ Second Harmonic Generation

^۲ Sum Frequency Generation

^۳ Difference Frequency Generation

^۴ Third Harmonic Generation

جدول ۱-۱: مقادیر نوعی از پارامترهای توصیف‌کننده‌ی چند پدیده‌ی پراکندگی نور [۱]

پدیده	جابه‌جایی (cm^{-1})	پهنای خط (cm^{-1})	زمان واهلش (ثانیه)	بهره (m/MW)
رامان	۱۰۰۰	۵	10^{-12}	5×10^{-5}
بریلوئن	۰/۱	5×10^{-3}	10^{-9}	10^{-4}
ریلی	.	5×10^{-4}	10^{-8}	10^{-6}
بال ریلی	.	۵	10^{-12}	10^{-5}

یکی از این پدیده‌های پراکندگی نور، پراکندگی رامان است. پراکندگی رامان از برهم‌کنش نور با مدهای ارتعاشی مولکول‌های تشکیل‌دهنده‌ی محیط پراکننده نتیجه می‌شود. به عبارتی، پراکندگی رامان به‌عنوان پراکندگی نور از فونون‌های نوری توصیف می‌شود. فونون یک کوانتوم انرژی است که در نقش یک شبه‌ذره، حرکت نوسانی اتم‌ها در بلور را توجیه می‌کند. دو نوع فونون وجود دارد: فونون نوری و فونون صوتی. فونون‌های نوری دارای بسامدهای بالاتری هستند.

پراکندگی بریلوئن، پراکندگی نور (فوتون‌ها) از امواج صوتی (فونون‌های صوتی) است.

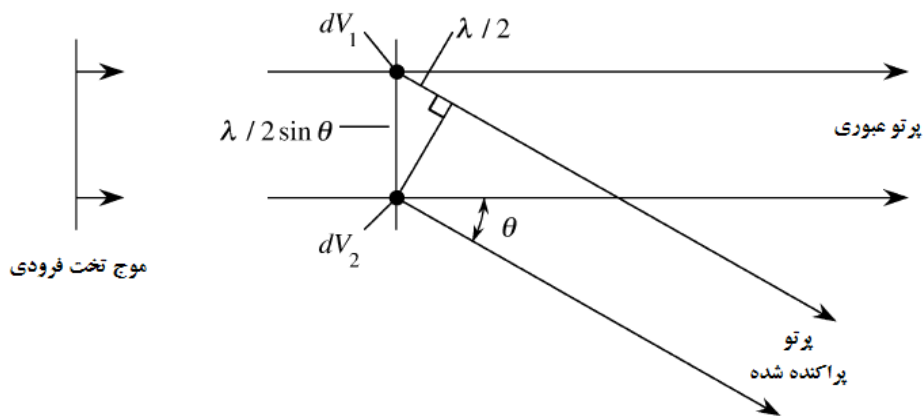
پراکندگی ریلی، پراکندگی نور از افت‌وخیزهای چگالی غیرانتشاری است و یا می‌توان آن را به‌عنوان پراکندگی نور از افت‌وخیزهای آنتروپی توصیف کرد. پراکندگی ریلی به پراکندگی شبه‌کشسان معروف است زیرا هیچ جابه‌جایی بسامدی را باعث نمی‌شود.

پراکندگی بال‌ریلی، پراکندگی نور از افت‌وخیزهای ناشی از چرخش مولکول‌های ناهمسان است. پراکندگی بال-ریلی برای مولکول‌هایی با تانسور قطبش‌پذیر همسان رخ نمی‌دهد.

¹ Fluctuations

۱-۲-۱ افت و خیزها به عنوان منشأ پراکندگی نور

پراکندگی نور به عنوان نتیجه‌ای از افت و خیزها در ویژگی‌های نوری ماده رخ می‌دهد. یک فرآیند پراکندگی نور، خودبه‌خودی است اگر افت و خیزها که باعث پراکندگی نور می‌شوند منشأ حرارتی داشته باشند. یک ماده‌ی کاملاً همگن می‌تواند نور را فقط در جهت روبه‌جلو پراکنده کند. به عبارتی برای چنین ماده‌ای هیچ پراکندگی رخ نمی‌دهد [۲]. این نتیجه را می‌توان با استفاده از شکل ۱-۲ تشریح کرد که یک محیط کاملاً همگن را که توسط یک موج تخت روشن شده است نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲: پراکندگی نور نمی‌تواند در یک محیط کاملاً همگن رخ دهد.

فرض می‌کنیم المان حجمی dV_1 نور را در جهت θ پراکنده کند. ضمناً برای هر جهتی به جز جهت دقیقاً روبه-جلو ($\theta = 0$)، باید یک المان حجمی نزدیک dV_2 که میدان را پراکنده می‌کند وجود داشته باشد تا با میدان پراکنده شده از dV_1 تداخل ویرانگر داشته باشد. از آن‌جا که بحث مشابهی را می‌توان برای هر المان حجمی در محیط به کار برد می‌توان نتیجه گرفت که پراکندگی در هیچ جهتی به جز $\theta = 0$ وجود ندارد. پراکندگی در جهت $\theta = 0$ به عنوان پراکندگی روبه‌جلوی همدوس معروف است [۱].

اگر چگالی محیط نایک‌نواخت باشد تعداد کل مولکول‌ها در المان حجمی dV_1 ممکن است با تعداد مولکول‌ها در dV_2 برابر نباشد و در نتیجه بین میدان‌های پراکنده شده توسط این دو المان، تداخل ویرانگر کامل رخ نمی‌دهد.

از آن‌جا که پراکندگی نور نتیجه‌ای از افت و خیزها در ویژگی‌های نوری یک ماده است، تانسور دی‌الکتریک محیط را (که برای سادگی فرض می‌کنیم در ویژگی‌های میانگینش همگن باشد) به صورت زیر بیان می‌کنیم [۱]: