

شناسنامه

The Feynman Lectures on Physics, Vol. 1, Ch. 33

درسنامه‌های فیزیک فاینمن، جلد ۱، فصل ۳۳

مترجم: محمدرضا نصیرزاده

ویراستار و حروف‌چین: محدثه‌سادات عسگری

نسخه‌ی ۱۰۰ پاییز ۱۳۹۹

حلقه‌ی مترجمان ژرفا

این اثر با کسب مجوز از ناشر بین‌المللی به منظور انتشار رایگان نسخه‌ی الکترونیکی آن تهیه شده است و حق نشر آن برای انجمن علمی ژرفا مستقر در دانشگاه صنعتی شریف محفوظ می‌باشد. ایرادات این نسخه را با ما در میان بگذارید و در پیشبرد این پروژه‌ی عام‌المنفعه مشارکت کنید. برای دریافت ترجمه‌ی دیگر فصل‌های این کتاب به وبسایت ژرفا مراجعه کنید.

این صفحه از قصد خالی گذاشته شده است.

فصل ۳۳

قطبش^۱

۱.۳۳ بردار الکتریکی نور

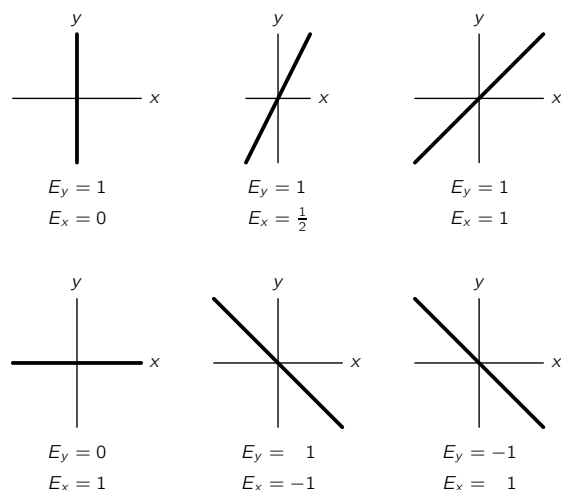
در این فصل ما باید پدیده‌هایی را مطرح کنیم که به برداری بودن میدان الکتریکی‌ای که در نور است، بستگی دارد. در فصل‌های قبلی ما اطمینانی از جهت نوسانات میدان الکتریکی نداشتیم، به جز این نکته که بردار الکتریکی در صفحه‌ای عمود بر جهت انتشار قرار دارد، اما فقط دانستن جهت این صفحه برای ما کافی نیست. ما اکنون مطمئنیم ویژگی اصلی این پدیده‌ها جهت خاص نوسانات میدان الکتریکی آنها است. در شرایط ایده آلی که نور تک فام^۲ است، میدان الکتریکی باید در یک فرکانس معین نوسان کند اما از آنجا که جزء x و جزء y می‌توانند جداگانه در یک فرکانس معین نوسان کنند، ما در ابتدا باید از برابری اثر تولید شده توسط تطبیق دو نوسان مختلف در زوایای درست نسبت به یکدیگر، اطلاع پیدا کنیم. چه میدان الکتریکی‌ای از دو جزء x و y تشکیل شده و در یک فرکانس معین نوسان می‌کنند؟ اگر یک مقدار مشخصی از ارتعاش^۳ در جهت y به ارتعاش در جهت x در همان فاز اضافه شود، نتیجه یک ارتعاش در جهت جدید در صفحه xy است. شکل ۱.۳۳ تصویر انطباق دامنه‌های مختلف برای ارتعاش‌های x و y را نشان می‌دهد. اما برایندهای نشان داده شده در شکل ۱.۳۳ تنها احتمالات ممکن نیستند. در همه‌ی این نمونه‌ها ما فرض کردیم ارتعاش‌های x و y در یک فاز هستند، اما به غیر از این نیز می‌تواند باشد یعنی x و y هم‌فاز نباشند. زمانی که ارتعاشات x و y در یک فاز نیستند بردار میدان الکتریکی به دور یک بیضی حرکت می‌کند و ما می‌توانیم این مورد را به سادگی تصور کنیم. اگر ما یک توپ را، با یک نخ بلند آویزان کنیم، می‌بینیم که توپ به راحتی می‌تواند آزادانه در صفحه‌ی افقی نوسان سینوسی داشته باشد. اگر مبداء مختصات x و y را در وضعیت ساکن توپ بگیریم، توپ می‌تواند با فرکانس یکسانی در جهت x یا y ، تاب بخورد. با انتخاب مکان و سرعت اولیه‌ی مناسب، ما می‌توانیم توپ را در امتداد محور x یا y یا در امتداد هر خط راستی

¹Polarization

³Vibration

²Monochromatic

در صفحه xy ، به نوسان دریاوریم. این حرکات توپ همانند نوسانات میدان الکتریکی نشان داده شده در تصویر ۱.۳۳ است.



۱.۳۳. برهم‌نهی ارتعاش‌های x و y در یک فاز

در هر یک از مثال‌ها، چون ارتعاشات راستای محور x و ارتعاشات راستای محور y هم‌زمان به مقدار بیشینه و کمینه خود می‌رسند، هم‌فاز هستند. اما ما می‌دانیم که کلی‌ترین حرکت توپ، حرکت بیضی است و این زمانی است که نوسانات x و y در یک فاز نباشند. همان‌طور که در شکل ۲.۳۳ می‌بینید، برهم‌نهی ارتعاشات x و y ، هم‌فاز نیستند. زاویه‌های مختلف بین فاز ارتعاش x و ارتعاش y در این شکل نشان داده شده است. جواب کلی، بردار الکتریکی‌ای است که دور یک بیضی می‌چرخد. حالت خاصی مثل حرکت در یک خط مستقیم، مربوط به فاز مخالف صفر (یا ضریب صحیح^۴ π) است و حرکت در دایره، مربوط به دامنه‌های برابر و فاز ۹۰ درجه (یا ضریب صحیح فرد^۵ $\pi/2$) است. در شکل ۲.۳۳، ما بردار میدان الکتریکی در راستای x و y را با اعداد مختلط نامگذاری کردیم، که به راحتی تفاوت فازها را نشان می‌دهد. البته نباید جزءهای حقیقی و موهومی بردار مختلط الکتریکی را در این نماد گذاری همراه با مختصات x و y میدان اشتباه گرفت. مختصات x و y در شکل ۱.۳۳ و ۲.۳۳ رسم شده است؛ دقیقاً همان میدان الکتریکی‌ای است که ما می‌توانیم اندازه بگیریم. جزءهای حقیقی و موهومی بردار میدان الکتریکی تنها برای آسان کردن ریاضیات به کار می‌روند و جنبه‌ی فیزیکی ندارند.

اکنون برخی اصطلاحات علمی را بیان می‌کنیم؛ نور زمانی که میدان الکتریکی در یک خط راست نوسان می‌کند، به صورت خطی قطبیده^۶ شده است (قطبیده تخت^۷ نیز گفته می‌شود)، شکل ۱.۳۳ نشان‌دهنده‌ی قطبش خطی است. زمانی که انتهای بردار الکتریکی یک بیضی را طی می‌کند، نور به صورت بیضوی^۸ قطبیده

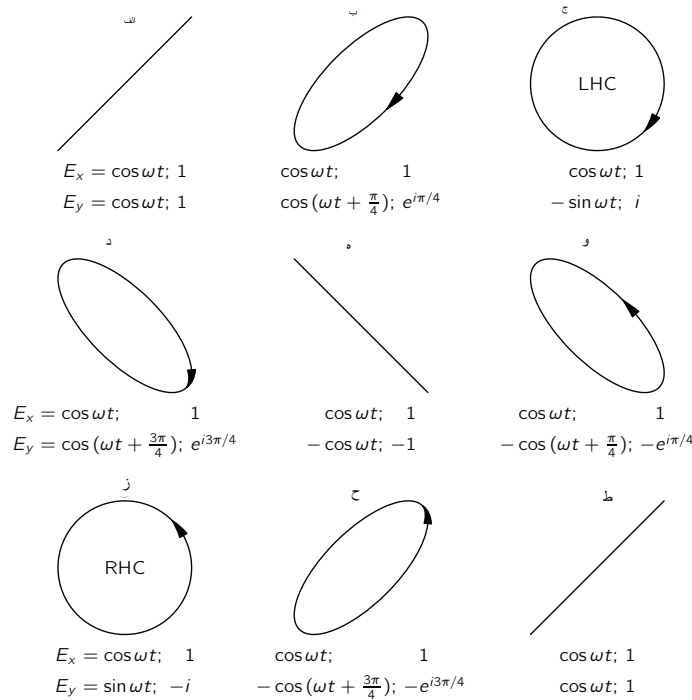
^۴An integral multiple

^۵Odd integral multiple

^۶Linearly polarized

^۷Plane polarized

^۸Elliptically polarized



۲.۳۳. برهم‌نهی ارتعاش‌های x و y با دامنه‌های برابر و فازهای متفاوت. مولفه‌های E_x و E_y به صورت مختلط و حقیقی نشان داده شده‌اند.

می‌شود و زمانی که یک دایره را طی کند قطبش دایروی^۹ است. اگر انتهای بردار الکتریکی را زمانی که نور مستقیم به سمت ما می‌آید به صورت پاد ساعتگرد حرکت کند ما آن را قطبش دایروی راست گرد^{۱۰} می‌نامیم. شکل ۲.۳۳- ز قطبش دایروی راست گرد و شکل ۲.۳۳- ج قطبش دایروی چپ گرد^{۱۱} را نشان می‌دهد. در هر دو مورد نور از صفحه خارج می‌شود. قرارداد ما برای نامگذاری قطبش دایروی راست گرد و چپ گرد، که اکنون مورد استفاده قرار گرفت، برای همه‌ی قسمت‌های دیگر فیزیک که نمایش دهنده‌ی قطبش است نیز برقرار است. البته باید این را در نظر داشت که در برخی کتاب‌های اپتیک، قواعد دیگری استفاده می‌شود.

ما قطبش نور را خطی، دایروی و بیضوی در نظر می‌گیریم که همه چیز را به غیر از نور غیرقطبیده^{۱۲} دربر می‌گیرد. اکنون این سوال باقی است که چگونه نور می‌تواند غیرقطبیده باشد در صورتی که ما می‌دانیم نور باید در یک یا چند جهت کروی ارتعاش داشته باشد. اگر نور تماماً تک فام نباشد یا x و y کاملاً ناهم‌فاز باشند، بردار الکتریکی نخست در یک جهت ارتعاش می‌کند و سپس در دیگر جهت‌ها؛ قطبش به طور مداوم در حال تغییر است. به یاد آورید که یک اتم در طول 10^{-8} ثانیه از خود تابش می‌کند. و اگر یک اتم قطبش

⁹Circular polarization

¹⁰Right-hand circular polarization

¹¹Left-hand polarization

¹²unpolarized light

معینی تابش کند و اتم دیگر نوری با یک قطبش دیگر انتشار دهد، قطبش هر 10^{-8} ثانیه تغییر می‌کند. اگر قطبش سریعتر از حدی باشد که برای ما قابل شناسایی است، ما نور را غیرقطبیده می‌نامیم؛ زیرا به طور میانگین تمام اثرات قطبش از بین می‌رود، به طوری که هیچ یک از اثرات تداخلی قطبش، خود را با نور غیرقطبیده نشان نمی‌دهد. پس ما این را از تعریف درمی‌یابیم که نور تنها زمانی غیرقطبیده است که ما متوجه قطبیده بودن یا نبودن آن نشویم.

۲.۳۳ قطبش نور پراکنده^{۱۳}

اولین مثال از اثرات قطبش نور که به بررسی آن می‌پردازیم، پراکندگی نور^{۱۴} است. یک پرتو نور را در نظر بگیرید مثلاً یک پرتوی درخشان از خورشید در آسمان. میدان الکتریکی بارها را در هوا به نوسان در می‌آورد و حرکت این بارها نوری را با شدت بیشینه در صفحه‌ی عمود^{۱۵} بر جهت ارتعاشات بار انتشار می‌دهد. پرتو خورشید غیرقطبیده است در نتیجه جهت قطبش و همینطور جهت ارتعاشات بارها در آسمان به طور مداوم تغییر می‌کند. اگر در نظر بگیریم نور در زاویه 90° درجه پراکنده شده است، ارتعاشات ذرات باردار شده تنها زمانی به سمت بیننده انتشار می‌یابد که ارتعاشات بر خط دید بیننده عمود باشد؛ سپس نور در امتداد مسیر ارتعاش قطبیده می‌شود. در نتیجه می‌توانیم بگوییم پراکندگی یکی از مثال‌های کاربرد قطبش است.

۳.۳۳ دو شکستی^{۱۶}

یکی دیگر از اثرات جالب قطبش این است که ماده‌هایی وجود دارند که در آن‌ها ضریب شکست برای نور قطبیده‌ی خطی در یک جهت با ضریب شکست نور قطبیده‌ی خطی در جهت دیگر، تفاوت دارد. فرض کنید ما ماده‌ای در اختیار داریم که از مولکولهای غیرکروی طویل تشکیل شده‌اند، که طول آن‌ها بیشتر از پهنای آن‌ها است و همین‌طور محورهای طولی این مولکول‌ها در ماده، به صورت موازی در کنار هم چیده شده‌اند. پس این سوال پیش می‌آید که زمانی که نوسان میدان الکتریکی از این خاصیت ماده عبور می‌کند چه اتفاقی می‌افتد؟ به نظر می‌رسد به دلیل ساختار این مولکول، الکترون‌ها در این ماده راحت‌تر به نوسانات در جهت موازی با محورهای مولکول‌ها واکنش می‌دهند. البته این راحت‌تر بودن نسبت به زمانی است که آن‌ها باید به میدان الکتریکی‌ای که سعی در هل دادن آن‌ها در یک زاویه قائمه، نسبت به محورهای مولکول‌ها دارد، واکنش دهند. بدین ترتیب ما انتظار واکنش متفاوتی را برای قطبش در یک جهت و قطبش در زاویه قائم در همان جهت داریم. اجازه دهید ما جهت محورهای مولکول را محور اپتیکی^{۱۷} بنامیم. زمانی که قطبش در جهت محور اپتیکی قرار دارد، ضریب شکست متفاوتی نسبت به زمانی که جهت قطبش در

¹³Polarization of scattered light

¹⁴Scattering of light

¹⁵Normal

¹⁶Birefringence

¹⁷Optic axis

زاویه قائم نسبت به آن است، داریم. این چنین خاصیتی را دوشکستی می‌نامیم. که دارای دو انکسارپذیری^{۱۸} می‌باشد، دو ضریب شکست که بستگی به جهت قطبش درون ماده دارد. حال چه نوع ماده‌ای می‌تواند دوشکستی باشد؟ بنابراین دلالی در ماده‌ی دوشکستی حتماً باید به تعداد معینی مولکول نامتقارن^{۱۹} هم جهت وجود داشته باشند. بی‌شک کریستال‌های مکعبی^{۲۰} که تقارن مکعبی دارند نمی‌توانند دوشکستی باشند اما کریستال‌های دراز سوزنی‌شکل^{۲۱}، حتماً از مولکول‌های نامتقارن تشکیل شده‌اند و یک مشاهده‌گر به آسانی می‌تواند متوجه اثرات آن بشود.

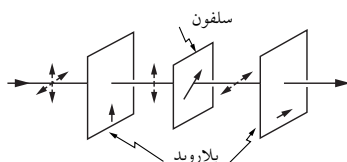
اجازه دهید ببینیم زمانی که یک نور قطبیده از یک صفحه تشکیل شده از ماده دوشکستی عبور می‌کند، ما باید انتظار چه اثراتی را داشته باشیم. اگر قطبش موازی محورهای اپتیکی بود، نور با یک میزان سرعت عبور می‌کند و اگر قطبش عمود بر محورها بود، نور با سرعت متفاوتی عبور خواهد کرد. حالت جالب اینجا به وجود می‌آید که بگوییم نور به صورت خطی در ۴۵ درجه نسبت به محورهای اپتیکی قطبیده شده است. اکنون قطبش ۴۵ درجه‌ای می‌تواند به عنوان برهم‌نهی قطبش x و y با دامنه‌های یکسان و هم‌فاز معرفی شود. همان‌گونه که در شکل ۲.۳۳-الف نشان داده شده است. زمانی که قطبش x و y با سرعت‌های متفاوتی جابه‌جا می‌شود، فاز آن‌ها نیز با مقدار متفاوتی در هنگام عبور نور از ماده، تغییر می‌کند. گرچه در شروع کار ارتعاشات x و y هم‌فاز بودند، ولی در درون ماده تفاوت فاز بین ارتعاشات x و y بستگی به ضخامت ماده دارد. وقتی که نور از درون ماده به راه خود ادامه می‌دهد، قطبش به صورت نشان داده شده در سری نمودارهای شکل ۲.۳۳، تغییر می‌کند. اگر ضخامت تیغه به اندازه‌ای باشد که باعث تغییر ۹۰ درجه‌ای فاز بین قطبش x و y شود شکل ۲.۳۳-ج، نور به صورت قطبش دایروی بیرون می‌آید. چنین ضخامتی را تیغه‌ی یک چهارم طول موج^{۲۲} می‌نامیم به این دلیل که فاز بین x و y یک چهارم دور با هم تفاوت دارند. اگر نور قطبیده‌ی خطی از یک تیغه‌ی یک دوم طول موج^{۲۳} عبور کند باز به صورت قطبیده‌ی تخت بیرون خواهد آمد، اما در زاویه قائم نسبت به جهت اصلی. درست همان‌گونه که در شکل ۲.۳۳-ه می‌بینیم.

هر فرد می‌تواند این پدیده را به وسیله یک تکه سلفون شبیه سازی کند. سلفون از مولکول‌های دراز لیفی‌مانند^{۲۴} تشکیل شده است که دارای خواص فیزیکی غیرمشابه^{۲۵} هستند؛ هم‌چنین لیف‌ها (فیبرها) در یک جهت مشخص قرار گرفته‌اند. برای نشان دادن دوشکستی، ما به یک پرتوی نور نیاز داریم که به صورت خطی قطبیده شده باشد. ما به راحتی می‌توانیم آن را با عبور دادن نور ناقطبیده از یک ورقه پلاروید^{۲۶} به دست آوریم. پلاروید، که بعدها به آن بیشتر می‌پردازیم، یک خاصیت مفید دارد اینکه نور قطبیده‌ی خطی‌ای را که در جهت موازی با محورهای پلاروید می‌تابد، با کمی جذب، عبور می‌دهد. اما نور قطبیده‌شده در جهت عمود بر محورهای پلاروید به شدت جذب می‌شوند. زمانی که ما یک نور ناقطبیده را از یک صفحه پلاروید عبور می‌دهیم تنها آن قسمت از پرتوی ناقطبیده که موازی با محورهای پلاروید ارتعاش می‌کند، عبور می‌کند

¹⁸Refrangibilities¹⁹Unsymmetrical²⁰Cubic crystal²¹Long needlelike crystals²²Quarter-wave plate²³Two quarters-wave plates²⁴Fibrous molecules²⁵Not isotropic²⁶Polaroid

به همین علت پرتو عبوری به صورت خطی قطبیده می‌شود. این خاصیت پلاروید برای تعیین جهت قطبش پرتو قطبیده خطی نیز مناسب است. برای فهمیدن اینکه پرتو، قطبیده‌ی خطی است یا خیر؛ فرد به راحتی می‌تواند پرتو نور را از میان صفحه پلاروید عبور دهد و صفحه را به سمت صفحه عمود^{۲۷} بر پرتو بچرخاند؛ اگر نور قطبیده‌ی خطی باشد؛ وقتی که محورهای پلاروید عمود بر جهت قطبش است نباید از صفحه عبور کند و وقتی که محور پلاروید به سمت ۹۰ درجه می‌چرخد، پرتوی عبوری تنها کمی ضعیف می‌شود و اگر شدت انتقالی^{۲۸} از جهت پلاروید مستقل باشد پرتو قطبیده‌ی خطی نیست.

برای نشان دادن دوشکستی سلفون‌ها ما از دو صفحه پلاروید استفاده می‌کنیم (شکل ۳.۳۳). اولین آن به ما یک پرتوی قطبیده‌ی خطی می‌دهد که ابتدا از سلفون و سپس از صفحه پلاروید دومی عبور داده شده است و دومین پلاروید برای شناسایی اثری که سلفون بر نور قطبیده‌ی عبوری از خود می‌گذارد، استفاده می‌شود.



۳.۳۳. دو شکستی سلفون به بیان تجربی. بردارهای الکتریکی در نور با خط‌چین نشان داده شده است. محورهای عبور صفحات پلاروید و محورهای نوری سلفون با فلش نمایش داده شده است. پرتو تابش ناقطبیده است.

اگر ما در ابتدا محورهای ورقه‌های پلاروید را عمود برهم قرار دهیم و سلفون را حذف کنیم، هیچ نوری از پلاروید دوم عبور نخواهد کرد. حال اگر یک سلفون را بین دو ورقه پلاروید قرار دهیم و ورقه‌ها را تا حدود محورهای پرتو بچرخانیم، در حالت کلی مشاهده می‌کنیم سلفون به برخی نورها اجازه عبور از پلاروید دوم را می‌دهد. گرچه دو جهت برای سلفون وجود دارد؛ در زاویه قائم نسبت به یکدیگر به ما اجازه عبور هیچ نوری از پلاروید دوم نمی‌دهد. اگر بخواهیم که نور قطبیده شده خطی بدون هیچ اثری در راستای قطبش از سلفون عبور بکند، جهت‌شان باید موازی و عمود بر محورهای اپتیکی ورقه سلفون باشد. ما فرض می‌کنیم که نور عبوری از سلفون با دو مقدار سرعت متفاوت و در دو جهت متفاوت اما بدون تغییر جهت قطبش عبور می‌کنند. زمانی که سلفون اندکی بین این دو جهت بچرخد (شکل ۳.۳۳)، مشاهده می‌کنیم که نور عبوری از پلاروید دوم روشن‌تر است.

این گونه به نظر می‌رسد که سلفون‌های معمولی‌ای که در بسته‌بندی‌های تجاری استفاده می‌شود، برای بیشتر رنگ‌ها در نور سفید، بسیار نزدیک به ضخامت نیم طول موج^{۲۹} هستند. مثل ورقه‌ای که محورهای نور قطبیده‌ی خطی آن ۹۰ درجه چرخیده است اگر پرتوی تابشی قطبیده‌ی خطی زاویه ۴۵ درجه با محورهای اپتیکی ایجاد کند در نتیجه پرتوی ایجاد شده توسط سلفون در جهتی ارتعاش می‌کند که از پلاروید دوم عبور

²⁷Normal

²⁹Half-wave

²⁸Transmitted intensity

کند.

اگر ما از نور سفید برای نمایش مان استفاده کنیم ورقه سلفون به یک ضخامت نیم طول موج مناسب برای بعضی از اجزا نور سفید تبدیل خواهد شد و پرتوی عبوری نیز رنگ این جزء را خواهد داشت. رنگ عبوری بستگی به ضخامت سلفون دارد و ما می‌توانیم اثر ضخامت سلفون را با کج کردن آن تغییر دهیم به طوری که نور از سلفون تحت زاویه خاصی عبور کند که نتیجه آن، طی کردن مسیر طولانی‌تری در سلفون است.

همان‌گونه که سلفون کج می‌شود رنگ عبوری نیز تغییر می‌کند. هر فرد می‌تواند با سلفون‌های متفاوت فیلترهایی تهیه کند که نور متفاوتی را از خود عبور می‌دهد. این فیلترها خواص جالبی دارند که زمانی که محورهای دو ورقه پلاروید بر هم عمودند یک رنگ و زمانی که موازی هستند تمام رنگها را عبور می‌دهند. یکی دیگر از کاربردهای جالب مولکول‌های هم‌راستا نیز بسیار مفید است. پلاستیک‌های مشخصی^{۳۰}، از مولکول‌های پیچیده^{۳۱} بسیار بلندی تشکیل شده‌اند که همگی آنها در هم پیچیده پیچ خورده‌اند. زمانی که پلاستیک بادقت جامد می‌شد مولکول‌ها همگی در یک توده^{۳۲} به هم پیچ خورده‌اند در نتیجه ما به همان تعداد که در یک جهت مولکول هم‌راستا داریم در جهت‌های دیگر نیز داریم پس پلاستیک تقریباً دوشکستی نیست، معمولاً زمانی که ماده به صورت جامد است فشار و تنش‌هایی در خودشان وجود دارد. از آنجا که مواد پلاستیکی کاملاً همگن نیستند، اگر ما به قسمتی از ماده پلاستیکی تنش وارد کنیم انگار که تمام رشته‌ها را در هم پیچیده‌ایم؛ پس رشته‌ها اغلب هم‌راستا و موازی با جهت تنش خواهند شد تا هر جهت دیگری. پس اگر فشاری بر پلاستیک وارد شود آن را به دوشکستی تبدیل می‌کند و هر شخص می‌تواند اثرات این دوشکستی را با عبور نور قطبیده از پلاستیک ببیند. اگر ما نور عبوری از ورقه پلوراید را بررسی کنیم، نقش‌های حاشیه‌ای تاریک و روشنی (اگر از نور سفید استفاده شود؛ به صورت رنگی) قابل مشاهده خواهند بود. این نقش متناسب با فشاری که بر نمونه وارد می‌شود، حرکت می‌کند و با شمردن حاشیه‌ها و دقت به اینکه بیشتر آن‌ها در کجا قرار دارند هر فرد می‌تواند متوجه شود که فشار چیست. مهندسان از این پدیده به عنوان وسیله‌ای برای پیدا کردن فشارها در قطعات با شمایل غیرمعمول که محاسبه آن‌ها سخت است، استفاده می‌کنند.

یکی دیگر از مثال‌های جالب تهیه‌ی ماده‌ی دوشکستی استفاده از مواد مایع است. مایع بلند تشکیل شده از مولکول‌های نامتقارن که مقدار کمی بار مثبت یا منفی در نزدیکی انتهای مولکول خود حمل می‌کنند و می‌توان آن مولکول‌ها را یک دوقطبی الکتریکی^{۳۳} دانست، را در نظر بگیرید. در برخورد درون مایع، مولکول‌ها به طرز تصادفی‌ای جهت‌دار می‌شوند پس به همان تعداد که مولکول‌ها در یک جهت هستند به همان تعداد نیز در جهت دیگر هم هستند. اگر ما یک میدان الکتریکی روی مولکول‌ها اعمال کنیم مولکول‌ها به سمت خطی شدن گرایش پیدا می‌کنند و زمانی که در یک راستا خطی شدند مایع تبدیل به یک دوشکستی می‌شود. همراه با دو ورقه پلوراید و یک سلول شفاف که دربردارنده‌ی مایع قطبی است ما

³⁰Certain plastics

³¹Complicated molecules

³²Mass

³³Electric dipole

می‌توانیم ترتیبی اتخاذ کنیم که در آن، نور تنها زمانی عبور کند که میدان اعمال شده باشد در نتیجه ما یک کلید الکتریکی برای نور داریم که سلول کر^{۳۴} نامیده می‌شود. این اثر که بیان می‌کند میدان الکتریکی می‌تواند در مایعات مشخصی دوشکستی ایجاد کند اثر کر^{۳۵} نامیده می‌شود.

۴.۳۳ پلاریزه^{۳۶}

تا اینجا ما موادی را که ضریب شکست آن‌ها برای نور قطبیده در جهت‌های مختلف، متفاوت بود، بررسی کردیم. تنها ضریب^{۳۷} کاربردی این‌چنین کریستال‌ها و مواد دیگر ضریب شکست آنها نیست، بلکه ضریب جذب^{۳۸}، که با توجه به جهت نور قطبیده متفاوت است، نیز برای ما مهم است. با همان قرار قبلی که بیان‌کننده‌ی پدیده‌ی دوشکستی بود قابل درک است که جذب می‌تواند با جهتی که بارها مجبور به ارتعاش در مواد ناهمسانگرد^{۳۹} می‌شوند، در حال تغییر باشد. ترمالین^{۴۰} و پلاروید دو مثال قدیمی و مشهور برای این مورد است. پلاروید از یک لایه نازک کریستال هراپاتیت^{۴۱} است که همگی با محورهای موازی‌شان هم‌راستا شده‌اند. این کریستال‌ها نور را زمانی که نوسانات در یک جهت است، جذب می‌کند. ولی هنگامی که در جهت‌های دیگر باشند این کار به خوبی صورت نمی‌گیرد.

فرض کنید ما نور قطبیده‌ی خطی را با زاویه θ به سمت یک ورقه پلاروید فرستادیم. به نظر شما نور با چه شدتی عبور می‌کند؟ این نور تابشی می‌تواند به اجزای عمود بر جهت عبور که بستگی به $\sin\theta$ دارد و در راستای عبور که بستگی به $\cos\theta$ دارد، تجزیه شود. دامنه‌ی نوسانی که از پلاروید خارج می‌شود تنها قسمت $\cos\theta$ را داراست و جزء $\sin\theta$ جذب خواهد شد. دامنه‌ای که از پلاروید عبور کرده به اندازه‌ی ضریبی از $\cos\theta$ کمتر از دامنه‌ی ورودی به آن است. انرژی‌ای که از پلاروید عبور می‌کند شدتش متناسب با توان دو $\cos\theta$ است. پس شدت ورودی زمانی منتقل می‌شود که نور پلاریزه شده با زاویه θ نسبت به جهت عبور وارد شده باشد. البته شدت جذب نیز برابر با $\sin^2\theta$ می‌باشد.

در ادامه با توجه به موقعیت پیش رو یک پارادوکس جالب ایجاد می‌شود: از آنجا که ما می‌دانیم امکان فرستادن یک پرتو نور از میان دو ورقه پلاروید با محورهای عبور از زاویه قائم وجود ندارد ولی اگر ما ورقه پلاروید سوم را بین دو ورقه اولی قرار دهیم که محور عبوری آن ۴۵ درجه نسبت به محورهای عبوری زاویه دارد، می‌بینیم بعضی نورها عبور داده می‌شوند. می‌دانیم که پلاروید نور را جذب می‌کند و چیزی را به وجود نمی‌آورد به همین ترتیب اضافه کردن یک ورقه در زاویه ۴۵ درجه اجازه عبور نور بیشتری را می‌دهد. بررسی این پدیده به عنوان یک تمرین به عهده دانشجو گذاشته می‌شود.

³⁴kerrcell

³⁵kerr

³⁶Polarizers

³⁷Value

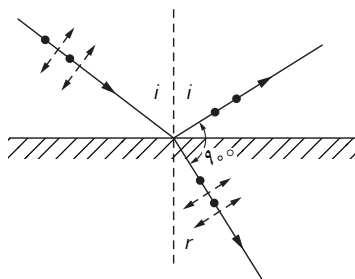
³⁸Absorption

³⁹Anisotropic

^{۴۰}Tourmaline نام سنگی نیمه قیمتی - مترجم -

^{۴۱}Herapathite یا سولفات یدوکینین، یک ترکیب شیمیایی است که بلورهای آن دو رنگ هستند. بنابراین می‌توانند برای قطبش نور استفاده شوند - مترجم -

یکی از جالب‌ترین و آشناترین مثال‌های قطبش که پیچیده هم نیست بازتاب نور از سطح کریستال‌ها و مواد سخت^{۴۲} است. باور کنید یا نه زمانی که نور از سطح یک شیشه بازتابیده می‌شود ممکن است قطبی شده باشد و توضیح فیزیکی آن نیز بسیار ساده است. بروستر به طور تجربی کشف کرد اگر پرتو بازتابیده و خود پرتو یک زاویه‌ی قائمه تشکیل دهند، نور بازتابیده از صفحه کاملاً قطبیده است. این مورد در شکل ۴.۳۳ نشان داده شده است اگر پرتو ایجاد شده در صفحه‌ای که واقع شده است قطبیده شده باشد، هیچ بازتابی در کل نخواهد بود؛ تنها اگر پرتو بر صفحه‌ی عمود بر محل وقوع، قطبی شده باشد بازتاب داده می‌شود. دلیل آن به راحتی قابل درک است در مواد بازتاب کننده نور، نور به صورت متقاطع قطبیده می‌شود و می‌دانیم که این حرکت بارها در مواد است که پرتو را تولید می‌کند و به آن پرتو، پرتوی بازتابیده می‌گوییم. منبع این نور بازتابیده، پرتوی تابشی بازتابیده شده، نیست. با تاملی عمیق نسبت به این پدیده می‌توانیم بگوییم که پرتوی تابشی بارهای نوسانی را در ماده حمل می‌کند که باعث به وجود آمدن پرتوی بازتابیده می‌شوند. از شکل ۴.۳۳ مشهود است که تنها نوسان عمود بر صفحه می‌تواند در جهت بازتابش پرتو تابش کند و در نهایت پرتو بازتابیده عمود بر صفحه تابش قطبیده خواهد شد. اگر پرتوی تابشی در صفحه تابش قطبیده شده باشد هیچ نور بازتابیده‌ای نخواهیم داشت.



۴.۳۳. بازتاب نور قطبیده‌ی خطی در زاویه بروستر. جهت قطبش با فلش‌های خط‌چینی نمایش داده شده است. نقطه‌های توپر نیز عمود بودن قطبش را نشان می‌دهند.

این پدیده را به راحتی به وسیله بازتاب پرتوی قطبیده‌ی خطی از یک سطح صاف شیشه می‌توان نشان داد. اگر شیشه طوری بچرخد که زوایای متفاوتی از پرتوی قطبیده‌ی تابشی را به وجود بیاورد، وقتی زاویه‌ی تابشی^{۴۳} از زاویه بروستر بیشتر شود، میرایی^{۴۴} تندی از شدت بازتابش مشاهده می‌شود. این میرایی فقط اگر صفحه‌ی تابش و قطبش یکی باشند، مشاهده می‌شود. اگر صفحه قطبش عمود بر صفحه تابش باشد، شدت بازتابش معمول، در تمام زوایا مشاهده می‌شود.

⁴²Difficult substances

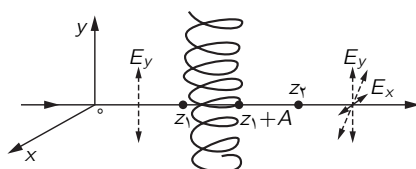
⁴⁴Attenuation

⁴³Angle of incidence

۵.۳۳ فعالیت اپتیکی^{۴۵}

یکی دیگر از اثرات جالب قطبش درموادی است که مولکول‌های آن‌ها بازتاب متقارن^{۴۶} ندارند. مولکول‌هایی به شکل مارپیچی^{۴۷} یا شبیه به دستکش یا هر شکل دیگری که اگر از طریق آینه مشاهده شود، مانند معکوس شدن دست چپ به دست راست درآینه، معکوس شوند. فرض کنید تمام مولکول‌های این ماده شبیه به هم هستند هیچکدام تصویر آینه‌ای یکدیگر نیستند چنین ماده‌ای می‌تواند اثر جالبی به نام فعالیت اپتیکی از خود نشان دهد؛ به این صورت که هنگام عبور نور قطبیده‌ی خطی از ماده، جهت قطبش حول محور پرتو می‌چرخد.

برای فهمیدن پدیده فعالیت اپتیکی نیاز به کمی به محاسبات است اما ما می‌توانیم به صورت کیفی ببینیم که این اثر چگونه می‌تواند باشد، بدون نیاز به محاسبات. مولکول‌های نامتقارنی را در نظر بگیرید که به شکل مارپیچی هستند (شکل ۵.۳۳). برای نشان دادن فعالیت اپتیکی، مولکول لزوماً نباید مارپیچی باشد، اما این شکل ساده‌ای است که ما می‌توانیم آن را به عنوان یک مثال معمول از نبود بازتاب متقارن به یاد داشته باشیم.



۵.۳۳. یک مولکول بدون تقارن آینه‌ای. یک پرتوی نور قطبیده‌ی خطی در جهت y ، به آن می‌تابد.

وقتی که پرتوی نور قطبیده‌ی خطی در جهت y ، به مولکول می‌تابد، میدان الکتریکی بارها را به بالا و پایین مارپیچ جابه‌جا می‌کند. در نتیجه جریان^{۴۸} تولید شده در جهت y است و انتشار^{۴۹} میدان الکتریکی در جهت y قطبیده می‌شود. با این وجود اگرچه الکترون‌ها مقید به حرکت در مارپیچ هستند، پس در همان حال که به سمت بالا و پایین می‌روند، باید در راستای x نیز حرکت داشته باشند. اگر A قطر مولکول مارپیچی باشد، زمانی که جریان در حال بالا رفتن از مارپیچ است، به سمت داخل صفحه $z = z_1$ و خارج صفحه $z = z_1 + A$ هم جریان دارد. شاید کسی فکر کند جریان در راستای x هیچ تابش خالصی^{۵۰} تولید نکند، چون که جریان‌ها در جهت‌های مخالف با طرف مقابل مارپیچ هستند. به هر حال اگر در نظر بگیریم جزء x از میدان الکتریکی در $z = z_2$ به هم می‌رسد. می‌بینیم که میدان با جریانی در $z = z_1 + A$ تابش می‌کند و تابش میدان از $z = z_1$ به z_2 ، به صورت مجزا، در زمانی با مقدار A/c می‌رسد پس در فاز $\pi + \omega A/c$ جدا می‌شود. چون که تغییرات فاز دقیقاً π نیست، دو میدان به طور کامل از بین نمی‌روند و

⁴⁵Optical activity

⁴⁶Reflection symmetry

⁴⁷corkscrew

⁴⁸Current

⁴⁹Radiating

⁵⁰Net radiation

مقداری از جز x در میدان الکتریکی برای ما باقی می ماند، که ناشی از حرکت الکترون ها در مولکول است. در جایی که میدان الکتریکی تنها در بردارنده ی جزء y است، این جزء کوچک x به جزء بزرگتر y اضافه می شود که موجب تولید میدانی می شود که نسبت به محور y ، جهت اصلی قطبش، کمی منحرف شده است. وقتی که نور در میان ماده حرکت می کند، جهت قطبش حول محورهای پرتو می چرخد. با طرح چندین مثال و در نظر گرفتن جریانی که با حرکت به علت تابش میدان الکتریکی ایجاد می شود، هر فرد می تواند خود را قانع کند که وجود فعالیت اپتیکی و علامت چرخش از سوگیری مولکول ها مستقل است. شیرهی تهیه شده از نشاسته ی ذرت^{۵۱} یک ماده معمولی است که دارای فعالیت اپتیکی می باشد. این پدیده به راحتی به وسیله ورقه پلازوییدی که یک پرتو قطبیده خطی تولید می کند، قابل نشان دادن است. سلول عبوردهنده ی^{۵۲} تشکیل شده از شیرهی ذرت و دومین پلازوید برای شناسایی جهت چرخش قطبش هنگام عبور نور از شیرهی ذرت است.

۶.۳۳ شدت نور بازتابیده^{۵۳}

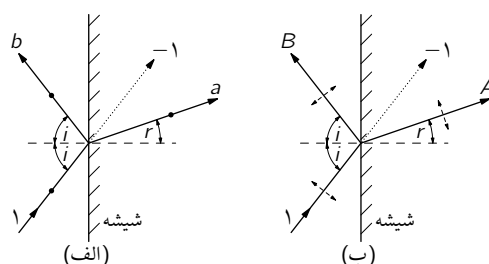
اکنون اجازه دهید به صورت کمی ضریب انعکاس را تابعی از زاویه در نظر بگیریم. شکل ۶.۳۳-الف نشان می دهد پرتو نور به سطح شیشه برخورد کرده، آن جا قسمتی از آن منعکس و قسمتی از آن درون شیشه شکسته شده است. فرض می کنیم که پرتو تابشی با دامنه واحد، عمود بر صفحه ی کاغذ به صورت خطی قطبیده شده است. ما دامنه ی موج بازتابی را b و دامنه ی موج شکسته شده^{۵۴} را a می نامیم. موج های انعکاسی و شکسته شده به صورت خطی قطبیده شده اند و بردارهای میدان الکتریکی موج های تابشی، انعکاسی و شکسته شده، همگی با یکدیگر موازی هستند. شکل ۶.۳۳-ب وضعیت مشابهی را نشان میدهد اما اکنون فرض میکنیم که موج فرودی با دامنه ی واحد در صفحه کاغذ قطبیده است. حال اجازه دهید دامنه موج انعکاسی و شکسته شده را A و B بنامیم.

ما می خواهیم شدت^{۵۵} انعکاس را در دو وضعیت نشان داده شده در شکل ۶.۳۳-الف و ۶.۳۳-ب را محاسبه کنیم. ما از قبل می دانستیم هنگامی که زاویه بین پرتو بازتابیده و شکسته شده ۹۰ درجه باشد، هیچ موج انعکاسی نخواهیم داشت (۶.۳۳-ب). حال ببینیم که می توانیم پاسخی کمی برای آن به دست آوریم یا نه، یعنی یک فرمول دقیق برای b و B به عنوان تابعی برای زاویه تابشی i .

اصلی که ما باید آن را بدانیم این است که جریانی که در شیشه ایجاد می شود، دو موج را تولید می کند؛ که نخست یک موج بازتابی است.

علاوه بر آن می دانیم که اگر جریانی در شیشه ایجاد نشود موج فرودی به راه مستقیم خود درون شیشه ادامه می دهد. به یاد آورید که تمام منبع های روی زمین یک میدان خالص تولید می کنند. منبع پرتوی نور فرودی باعث تولید میدان با دامنه ی واحد می شود که درون شیشه در امتداد نقطه چین در شکل حرکت می کند. این میدان قابل مشاهده نیست و در نتیجه جریان تولید شده در شیشه باید میدانی با دامنه ۱-

⁵¹Corn syrup⁵²Transmission cell⁵³The intensity of reflected light⁵⁴Refracted wave⁵⁵Strong



۶.۳۳. یک موج تابشی با دامنه واحد به سطح شیشه، بازتابیده و شکسته می‌شود. در (الف) موج تابشی قطبیده خطی و عمود بر صفحه‌ی کاغذ است. در (ب) موج تابشی قطبیده خطی است و جهت آن هم با فلش‌های خط‌چین نشان داده شده است.

ایجاد کند که در امتداد نقطه چین حرکت می‌کند. ما برای محاسبه‌ی دامنه‌ی موج شکسته شده a و A از این مطلب استفاده می‌کنیم.

در شکل ۶.۳۳-الف می‌بینیم که حرکت بارها درون شیشه، که نتیجه‌ی میدان a درون شیشه بوده است، باعث تابش میدانی با دامنه‌ی b می‌شود، بنابراین b متناسب با a است. ممکن است فکر کنیم که چون دو شکل ما دقیقاً یکی هستند به جز در جهت‌گیری قطبش، نسبت B/A برابر با همان نسبت b/a می‌باشد که چندان درست نیست زیرا در شکل ۶.۳۳-ب همه‌ی جهت‌های قطبش همانند شکل ۶.۳۳-الف موازی نیستند و فقط جز A بر B عمود است و $A \cos(i+r)$ در تولید B موثر است. بیان ریاضی صحیح برای این تناسب به صورت زیر است:

$$\frac{b}{a} = \frac{B}{A \cos(i+r)}. \quad (۱.۳۳)$$

اکنون از یک ترفند استفاده می‌کنیم: می‌دانیم که در هر دو قسمت (الف) و (ب) شکل ۶.۳۳ میدان الکتریکی در شیشه بارهای نوسانی ایجاد می‌کند که باعث تولید میدانی با دامنه ۱- و قطبیده موازی با پرتو فرودی می‌باشد و در جهت خط‌چین در حال حرکت است. اما از قسمت (ب) شکل می‌بینیم که تنها جزء A که عمود بر خط‌چین است، قطبش مناسب برای تولید این میدان را دارد. از آن جایی که در شکل ۶.۳۳-الف دامنه کامل a موثر است، چون قطبش موج a موازی با قطبش موج با دامنه ۱- است؛ پس می‌توان نوشت:

$$\frac{A \cos(i-r)}{a} = \frac{-1}{-1}, \quad (۲.۳۳)$$

چون دو دامنه در سمت چپ معادله (۲.۳۳) هرکدام موجی با دامنه ۱- تولید می‌کنند. با تقسیم کردن معادله (۱.۳۳) بر معادله (۲.۳۳) به دست می‌آوریم:

$$\frac{B}{b} = \frac{\cos(i+r)}{\cos(i-r)}, \quad (۳.۳۳)$$

ما می‌توانیم نتیجه‌ای را که به دست می‌آید با دانسته‌ی قبلی خود، تطبیق دهیم. اگر $(i + r) = 90^\circ$ قرار دهیم، معادله (۳.۳۳) به $B = 0$ ختم می‌شود. همان‌طور که بروستر چنین می‌گوید؛ پس نتیجه‌گیری ما حداقل کاملاً غلط نیست.

ما برای موج فرودی یک واحد دامنه فرض کردیم در نتیجه $|B|^2/|A|^2$ ضریب موج‌های بازتابیده‌ی قطبیده در صفحه تابشی است و $|b|^2/|a|^2$ ضریب موج‌های بازتابیده‌ی قطبیده‌ی عمود بر صفحه تابشی است. نسبت این دو ضریب انعکاس به وسیله معادله (۳.۳۳) محاسبه شده است.

اکنون ما کار جالبی انجام می‌دهیم و نه فقط نسبت بلکه هر ضریب $|B|^2$ و $|b|^2$ را به صورت جداگانه محاسبه می‌کنیم. ما از بقای انرژی^{۵۶} می‌دانیم که انرژی در موج شکسته شده باید برابر با انرژی موج تابشی منهای انرژی بازتابیده شده باشد یک جا $|B|^2 - 1$ و یک جای دیگر $|b|^2 - 1$ می‌شود. علاوه بر این انرژی‌ای که در شکل ۶.۳۳-ب از شیشه عبور می‌کند با انرژی‌ای که از شیشه در شکل ۶.۳۳-الف عبور می‌کند به وسیله‌ی نسبت $|A|^2/|a|^2$ ارتباط دارد که همان مجذور دامنه‌ی شکست است. شاید کسی بپرسد که ما می‌دانیم چگونه انرژی داخل شیشه را حساب کنیم چون که این جا انرژی‌های حرکتی اتم به علاوه انرژی میدان الکتریکی را می‌دانیم که چیست؛ اما این واضح است که تمام سهم‌های گوناگون انرژی کل متناسب است با مجذور دامنه میدان الکتریکی. پس می‌توان نوشت:

$$\frac{1 - |B|^2}{1 - |b|^2} = \frac{|A|^2}{|a|^2}. \quad (4.33)$$

اکنون ما معادله (۲.۳۳) را جایگذاری می‌کنیم تا از تعریف بالا A/a را حذف کنیم و مقادیر b و B را به وسیله معادله (۳.۳۳) به دست آوریم.

$$\frac{1 - |b|^2 \frac{\cos^2(i+r)}{\cos^2(i-r)}}{1 - |b|^2} = \frac{1}{\cos^2(i-r)}. \quad (5.33)$$

این معادله فقط دارای یک دامنه‌ی مجهول b می‌باشد، $|b|^2$ ، محاسبه می‌کنیم:

$$|b|^2 = \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} \quad (6.33)$$

و با استفاده از معادله (۳.۳۳) داریم:

$$|B|^2 = \frac{\tan^2(i-r)}{\tan^2(i+r)}. \quad (7.33)$$

پس ما ضریب انعکاس $|b|^2$ را برای موج تابشی قطبیده، عمود بر صفحه‌ی تابشی پیدا کردیم و همین‌طور ضریب انعکاس $|B|^2$ برای موج تابشی قطبیده را در صفحه تابشی یافتیم.

⁵⁶Conservation of energy

می‌توان همراه با استدلال‌های این خاصیت پیش برویم و حقیقی بودن b را نتیجه بگیریم. برای اثبات این، باید حالتی را در نظر بگیریم که نور از هر دو سوی شیشه، هم‌زمان به سطح می‌رسند؛ این وضعیت به راحتی قابل آزمایش تجربی نیست اما تحلیل تئوری آن جالب خواهد بود. اگر ما این حالت کلی را تحلیل کنیم می‌توانیم ثابت کنیم که b باید حقیقی باشد و سپس این را که $b = \pm \sin(i-r)/\sin(i+r)$. حتی می‌توان علامت را نیز با در نظر گرفتن حالتی که بازتاب از یک لایه بسیار نازک روی سطح و پشت آن وجود دارد، به دست آوریم و مقدار نور بازتابیده را محاسبه کنیم. ما می‌دانیم که یک لایه نازک چه مقدار نور را بازتاب می‌کند چون که ما مقدار جریان تولید شده را می‌دانیم و حتی ما میدانی که با این چنین جریانی به وجود آمده را نیز به دست آورده‌ایم. می‌توانیم با این استدلال‌ها نشان دهیم که:

$$b = -\frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)}, \quad B = -\frac{\tan(i-r)}{\tan(i+r)}. \quad (۸.۳۳)$$

این بیانی است برای اینکه ضریب انعکاس، تابعی از زاویه تابش و بازتابش است که فرمول‌های بازتاب فرنل^{۵۷} نامیده می‌شوند.

اگر فرض کنیم حد زاویه‌های i و r به سمت صفر میل کند متوجه می‌شویم برای حالت تابش عادی^{۵۸}، $B^2 \approx b^2 \approx (i-r)^2/(i+r)^2$ برای هر دو قطبش است؛ چون که سینوس‌ها تقریباً برابر با زاویه‌ها هستند همانند تانژانت‌ها. می‌دانیم که $\sin(i)/\sin(r) = n$ و هنگامی که زوایا کوچک هستند $i/r \approx n$ است. پس نشان دادن ضریب انعکاس برای تابش عادی آسان است، که برابر است با:

$$B^2 = b^2 = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}.$$

بسیار جالب است که ببینیم چه مقدار نور در تابش عادی از سطح دریا بازتابیده می‌شود؛ مثلاً برای آب n برابر $۴/۳$ است در نتیجه ضریب بازتابش $\approx ۲\%$ (۱/۷)^۲ می‌باشد. یعنی در یک تابش عادی تنها دو درصد نور از سطح آب بازتابیده می‌شود.

۷.۳۳ انعکاس غیرعادی^{۵۹}

اثر قطبش اخیر که مورد بحث قرار گرفت در واقع فقط یکی از اولین نتایج ما بود مورد بعدی انعکاس‌های غیرعادی است.

ملوانانی که از ايسلند دیدن می‌کردند کریستال‌های تیرآهن ايسلندی ($CaCO_3$) را همراه خود به اروپا بردند که دارای این خاصیت بود که همه چیز از میان کریستال دوتایی دیده می‌شد. این توجه هویگنس^{۶۰} را

^{۵۷}Fresnel's reflection

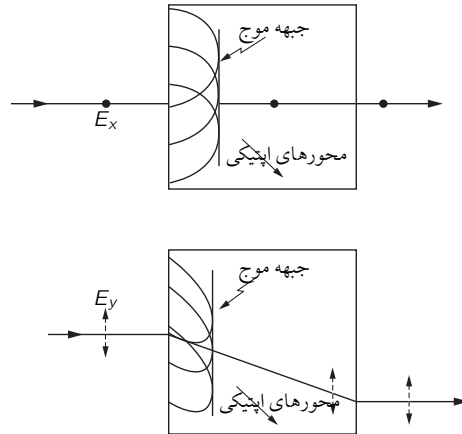
^{۵۸}Normal incidence

^{۵۹}Anomalous refraction

^{۶۰}Christiaan Huygens

دانشمند و فیزیک‌دان سرشناس هلندی سده‌ی هفدهم

جلب کرد، او نقش مهمی را در کشف قطبش ایفا کرد. مثل اکثر مواقع یکی از سخت‌ترین موارد، توضیح پدیده‌ای است که برای اولین بار کشف می‌شود. تنها بعد از اینکه ما متوجه جنبه فیزیکی مسئله شدیم می‌توانیم این پدیده‌ها را با دید کاملاً واضح و ساده نشان دهیم.

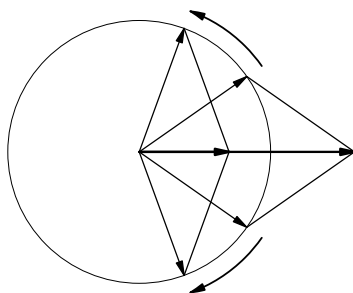


۷.۳۳. نمودار بالایی مسیر برخورد پرتوی عادی به کریستال دوشکستی است و پرتوی غیرعادی نیز در نمودار پایین نشان داده شده است. محورهای اپتیکی در صفحه‌ی کاغذ قرار دارد.

انعکاس غیرعادی قسمتی از همان دوشکستی است که قبلاً در مورد آن صحبت کردیم. انعکاس غیرعادی زمانی ایجاد می‌شود که محورهای اپتیکی ما، یا همان محورهای بلند نامتقارن مولکول‌های ما، با سطح کریستال موازی نیستند. در شکل ۷.۳۳ دو تکه از مواد دوشکستی همراه با محورهای اپتیکی نشان داده شده‌اند. در شکل بالایی و پرتو تابشی‌ای که به صورت خطی و در جهت عمود بر محورهای اپتیکی قطبیده شده است، به سطح ماده برخورد می‌کند. وقتی پرتو با سطح ماده برخورد می‌کند، هر نقطه در سطح به عنوان منبع موجی که درون کریستال با سرعت $v_{\perp}$ عبور می‌کند، عمل می‌کند. سرعت نور در کریستال برای زمانی است که صفحه‌ی قطبش عمود با محورهای اپتیکی باشد. جبهه‌ی موج^{۶۱} پوش^{۶۲} یا مکان هندسی^{۶۳} تمام این امواج کروی^{۶۴} کوچک است. جبهه‌ی موج مستقیماً از میان کریستال عبور می‌کند و از طرف دیگر آن خارج می‌شود. این فقط یک رفتار معمولی است که ما انتظار آن را نیز داشتیم و این پرتو یک پرتو عادی^{۶۵} نامیده می‌شود.

در شکل پایینی نور قطبیده‌ی خطی که بر روی کریستال فرو می‌افتد، جهت قطبشش ۹۰ درجه می‌چرخد. در نتیجه محورهای اپتیکی در صفحه‌ی قطبش قرار می‌گیرند. اکنون موج‌های کوچک ناشی شده از هر نقطه‌ای در سطح کریستال را در نظر می‌گیریم. می‌بینیم که آن‌ها به شکل موج‌های کروی پخش نمی‌شوند. نور در امتداد محورهای اپتیکی با سرعت $v_{\perp}$ حرکت می‌کند زیرا قطبش عمود بر محورهای

⁶¹Wavefront⁶²Envelope⁶³Locus⁶⁴Spherical waves⁶⁵Ordinary ray



۸.۳۳. مجموع دو بردار چرخنده در جهت‌های مخالف (یعنی قطبش راستگرد و چپ‌گرد- مترجم-) با دامنه‌های برابر، یک بردار با جهت ثابت اما دامنه‌ی نوسانی تولید می‌کند.

اپتیکی است. وقتی نور عمود بر محورهای اپتیکی حرکت می‌کند سرعت آن برابر با $v_{||}$ می‌باشد چون قطبش موازی با محورهای اپتیکی است. در مواد دوشکستی $v_{||} \neq v_{\perp}$ است، و در شکل $v_{||} < v_{\perp}$. تحلیل‌های کامل‌تر نشان خواهد داد که موج‌ها در سطح بیضی که محورهای اپتیکی به عنوان قطر اصلی بیضی است، پخش شده‌اند. پوش^{۶۶} همه‌ی موج‌های بیضی، جبهه‌موجی است که از میان کریستال، در جهت نمایش داده شده عبور می‌کند. در پشت سطح نیز پرتو مثل سطح جلویی منحرف شده در نتیجه نور موازی با نور تابشی ظاهر می‌شود اما نسبت به آن پراکنده شده است. آشکار است که این پرتو از قانون اسنل^{۶۷} پیروی نمی‌کند اما در جهت عجیبی حرکت می‌کند به همین دلیل است که آن را پرتو غیرعادی^{۶۸} می‌نامند.

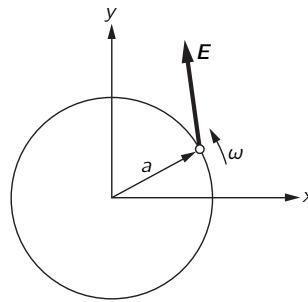
زمانی که پرتوی غیرقطبیده به طور نامنظم شکسته می‌شود و به کریستال برخورد می‌کند، به یک پرتوی عادی و غیرعادی تقسیم می‌شود که نوع عادی آن به طور معمول و مستقیم به مسیر خود ادامه می‌دهد و نوع غیرعادی آن هنگام عبور از کریستال پراکنده می‌شود. این دو پرتوی ظاهر شده به صورت خطی در زاویه قائم نسبت به یکدیگر قطبیده شده‌اند. میتوان به راحتی نشان داد که با یک ورقه‌ی پلاروید می‌توان قطبش پرتوهای ظاهر شده را تحلیل کرد. هم‌چنین می‌توانیم درستی تفسیر خود از این پدیده را با فرستادن نور قطبیده‌ی خطی به درون کریستال نشان دهیم. به وسیله جهت‌دهی صحیح به قطبش پرتو تابشی، می‌توانیم این نور را مستقیم و بدون تفکیک شدن عبور دهیم یا می‌توانیم بدون تفکیک شدن ولی با پراکندگی عبور دهیم.

ما اینجا در شکل ۱.۳۳ و ۲.۳۳ تمام حالات قطبش و برهم‌نهی دو قطبشهای ویژه با نام‌های x و y که در مقدار فاز با هم تفاوت دارند، ارائه کردیم. باقی جفت‌ها می‌توانند به صورت برابر مورد استفاده قرار گیرند؛ قطبش در امتداد هر دو محورهای عمود x' و y' شیب‌دار به x و y به درستی عمل می‌کنند (برای مثال هر قطبش می‌تواند از برهم‌نهی موردهای الف و ه از شکل ۲.۳۳ به وجود بیاید). جالب است که این ایده می‌تواند برای دیگر حالات تعمیم داده شود؛ برای مثال هر قطبش خطی می‌تواند از برهم‌نهی مقادیر مناسبی در فاز سمت راست یا چپ قطبش دایره‌ای باشد (موارد ج و ز شکل ۲.۳۳)، از چرخش دو بردار در جهت‌های مختلف و یک بردار نوسانی نتیجه می‌دهد (شکل ۸.۳۳).

^{۶۶}معادل کلمه‌ی Envelope است که در فارسی تقریباً معادل پوش یا برهم‌نهی است- مترجم-

^{۶۷}Snell's law

^{۶۸}Extraordinary ray



۹.۳۳. بار متحرک در دایره تحت تاثیر قطبش دایروی نور

اگر فاز یکی از آن‌ها نسبت به دیگری جابه‌جا شود خط شیب‌دار می‌شود؛ بدین ترتیب همه‌ی تصاویر شکل ۱.۳۳ می‌توانند با «برهم‌نهی مقادیر هم‌سان راست و چپ قطبش دایروی نور در فازهای متناسب مختلف» نام‌گذاری شوند. همانند تیغه‌ی سمت چپ فاز که پشت به سمت راست است، جهت قطبش خطی تغییر خواهد کرد. در نتیجه مواد اپتیکی فعال به تعریفی دوشکستی هستند. خاصیت آن‌ها می‌تواند به وسیله ضریب‌های مختلف قطبش‌های کروی چپ‌گرد و راست‌گرد نور تعریف شود. برهم‌نهی قطبش دایروی چپ و راست نور با شدت‌های مختلف، نور قطبیده بیضوی تولید می‌کند.

قطبش دایروی نور یک خاصیت جالب دیگری نیز دارد، اینکه همراه با خود تکانه زاویه‌ای^{۶۹} حمل می‌کند (در نزدیکی جهت انتشار). برای نشان‌دادن آن فرض می‌کنیم که چنین نوری بر روی یک اتم که دارای یک نوسان هماهنگ است فرود می‌آید که می‌تواند به صورت برابر در هر جهتی در صفحه xy پراکنده شود. سپس پراکندگی x و y الکترون موجب می‌شود که جزء E_x و E_y میدان، 90° درجه اختلاف فاز داشته باشند که بیان‌کننده‌ی حرکت دایره‌ای الکترون با سرعت زاویه‌ای ω ، تحت تأثیر چرخش میدان الکتریکی نور است (شکل ۹.۳۳). بستگی به میرایی خصوصیات وابسته به نوسان، جهت پراکندگی a الکترون و جهت نیروی $q_e E$ وارد بر آن نیازی نیست که یکی باشد اما با این وجود هر دو با هم می‌چرخند. E می‌تواند جزئی در زاویه قائم نسبت به a داشته باشد. پس کار بر روی سیستم تمام است و گشتاور τ نیز اعمال شده است و کار انجام شده در هر ثانیه برابر با $\omega\tau$ می‌باشد. با گذشت یک دوره زمانی T ، انرژی جذب شده برابر با $T\omega\tau$ می‌شود. درحالی که τT تکانه‌ی زاویه‌ای منتقل شده مربوط به جذب انرژی است. می‌بینیم که پرتو نور قطبیده شده دایروی راست‌گرد دربردارنده تمام انرژی ε بر روی تکانه‌ی زاویه‌ای (با بردار در طول جهت انتشار) ε/ω می‌باشد. برای زمانی که این پرتو نیز جذب شود تکانه‌ی زاویه‌ای به جذب‌کننده منتقل می‌شود. نور چپ‌گرد نیز تکانه‌ی زاویه‌ای با علامت مخالف $-\varepsilon/\omega$ دارد.

⁶⁹ Angular momentum