ازمعروفترین خواص نوراینستکه انعکاس ، انتقال وانکسارآن بخاطرشدتش ویاوجود شعاع نورانی دیگری تغییرنمیکند . طبق تئوری الکترومغناطیسی James Clerk Maxwell رفتاریك شعاع نورانی رامیتوان فقط با دانستن طول موج وسرعت آن درماده پیش بینی نمود. امروزه بکمك لیزرهاکه شعاع یکرنگ (تك فرکانس) وشدیدی تولید میکنند میتوان خواص دیگرنور رابررسی نمود .

مثلاً چندی پیش توانستند باتاباندن شعاع شدید لیزرد رمواد شفاف ، هارمونیکهای فرکانس اصلی اشعه راتولید نمایند . همچنین فعل و انفعال دوشعاع نورانی درمادّه رامورد بررسی قرار دادند وحتی پیش بینی میگردد که درخلاء نیزفعل وانفعال دوشعاع نورانی عملی شود .

دربرخورد یك کوانتم نوربایك مولکول مقداری ازانرژی کوانتم مزبوربه مولکول انتقال می یابد و سپس بصورت کوانتمی باانرژی کمترازمولکول صادر میگردد . یاطبق تئوری موجی نورشعاع نورانی پس ازبرخورد باماده جذب آن شده سپس با فرکانس کمتری ازآن متشعشع میشود . این فعل وانفعال نوروماده رادرسال ۱۹۲۷ رامان C.V.Raman فیزیکدان هندی کشف کرد وبه اثررامان معروف است . امروزه کشف شده است که بابکاربردن اشعهٔ لیزراثررامان بوجه شدیدتری خودنمائی میکند .

اشعهٔ الکترومغناطیس ازدومؤلفهٔ الکتریکی ومغناطیسی که برهم عمودند وبایکدیگرنوسان میکنند تشکیل شده است وممکن است بااعمال یك میدان الکتریکی یامغناطیسی اضافی بر مادهٔ شفافی سرعت نورراتغییرداد . سالها پیش درسال ۱۸۴۵ Michael Faraday کشف کرد که یك میدان مغناطیسی ساکن (مترجم : میدانهائیکه تغییراتی نسبت بزمان ندارند میدان ساکن نامیده میشوند) درجهت سیر نوردرداخل شیشه تأثیرمیکنند . اونشان داد که هنگام حرکت شعاع نورانی درطول خطوط میدان مغناطیسی صفحهٔ پلاریزاسیون میچرخد. سی سال بعد John Kerr فیزیکدان اسکاتلندی بااعمال میدان الکتریکی قوی‌ای درشیشه انکسارمضاعف تولید کرد . ازدوتجربهٔ فوق درمی یابیم که بااعمال میدانهای الکتریکی ومغناطیسی میتوان ضریب انکسارمادّه راتغییر داد .

درتجربهٔ فارادیه یك موج صفحه‌ای مثل دو موج دوّارکه درخلاف جهت یکدیگرمیچرخند

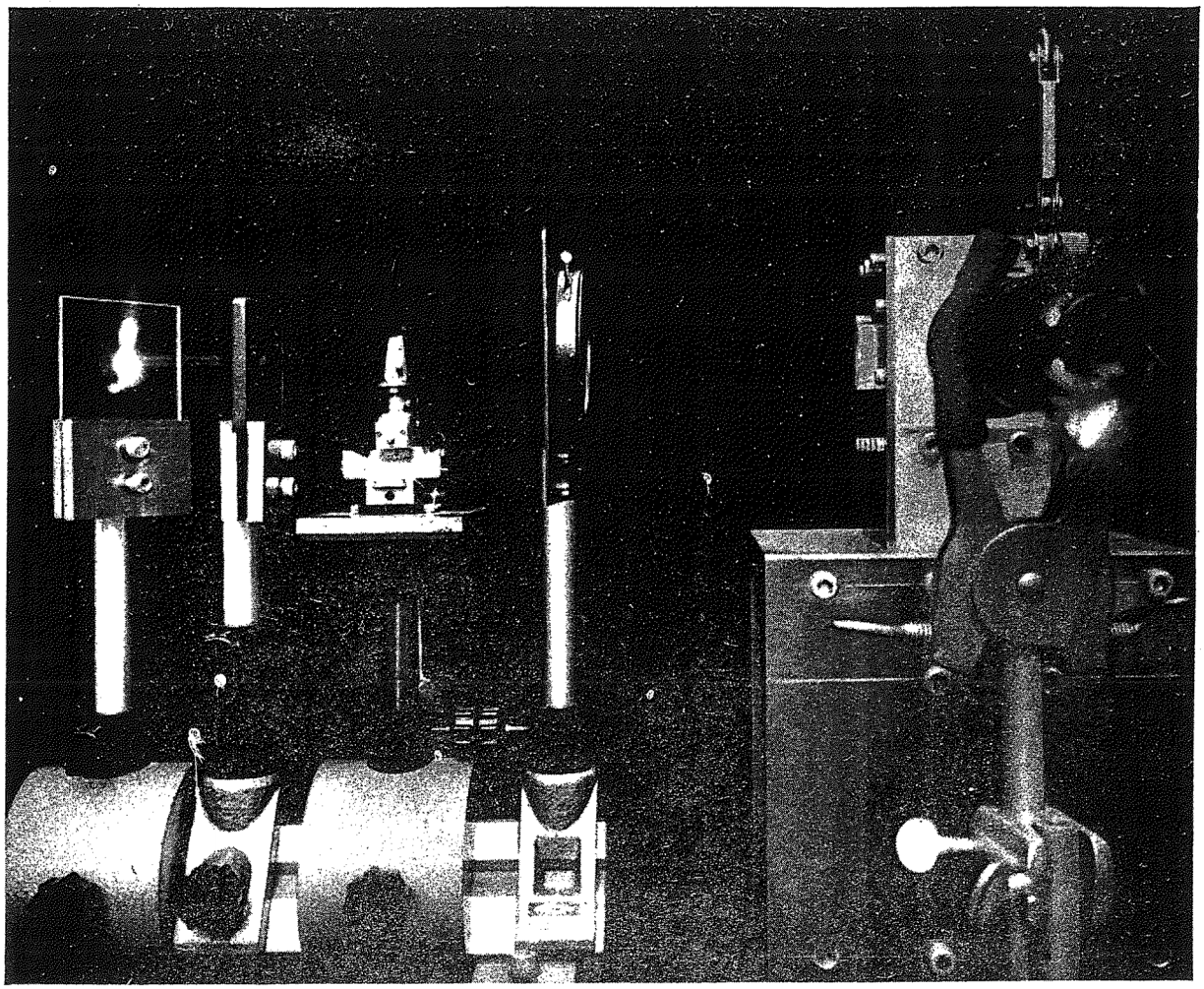
عمل میکند • اعمال میدان مغناطیسی ضریب انکسارشیشه رابرای یکی بیش ازدیگری تغییر میدهد •

آثارفاراده و کر نشان میدهدکه اشعهٔ نورانی شدیدبامیدان الکتریکی ومغناطیسی خودش میتواندضریب انکسارمحیطی راکه ازآن میگذرد تغییردهدودرنتیجه درانتشار خودو شعاع دیگری که ازآن محیط میگذرد مؤثرباشد • این مطلب درتجربیات اخیرنیزتصدیق شده است • واضح است که ضریب انکسارمحیط دارای تغییرات پریودیك خواهد بودوفرکانس تغییرات ضریب انکساربرابرفرکانس شعاع نورانی ایست که این تغییرات راسبب شده است • حال اگرشعاع نورانی ای بافرکانس دیگری موجودباشد سرعت آن باتغییرات ضریب انکسارمحیط تغییرخواهدکرد • ازاین فعل وانفعال نتیجه میگردد که باانجام عملیات فوق یك شعاع نورانی میتواند شعاع دیگری رامدوله کندوفرکانسهائی برابرمجموع وتفاضل آن دوبوجود آید •

درتئوری کوانتیك نورکه طبق آن نوربصورت بسته هائی ازانرژی بنام فوتون انتشارمی‌یابد فرآیندفوق رابافعل وانفعالات فوتونهاتشریح میکنند • مثلا هنگامیکه دوفوتون نابود میگردند فوتون جدیدی پدید میآیدکه انرژیش مجموع انرژی های دوفوتون نابود شده است وچون انرژی فوتون بافرکانس شعاع نورانی نسبت مستقیم دارد درنتیجه فرکانس فوتون حاصل‌نیز برابرمجموع دوفرکانس‌فوتونهای نابود شده میباشد • دیگرفعل وانفعالات اشعهٔ‌نورانی‌را میتوان بابرخورد وتفرّق زوجهای فوتون توضیح داد •

ازآنجاکه منابع نورمعمولی نورهای بامیدان های‌الکتریکی ومغناطیسی‌قوی تشعشع نمیکنند نمیتوان‌درآزمایش باآنهابه‌فعل وانفعالات‌غیر خطی فوق رسید • میدان الکتریکی نورخورشید درسطح زمین دارای دامنه ای درحدود۱۰ولت برسانتیمتراست واین میدان ضریب انکساررادر تجربهٔ کر فقط باندازهٔ‌یك قسمت 10^{-15} قسمت تغییرمیدهد • میدان مغناطیسی نورخورشید حدودیك سیم $(\frac{1}{30})$ گوس است‌که درتجربهٔ فاراده باندازهٔ 10^{-12} برابرضریب انکساررا تغییرمیدهدوبدنیست‌که متذکرشویم میدان مزبوریکدهم میدان مغناطیسی زمین میباشد • باید توجه داشت‌که منابع نورانی ای باشدت بیشترچون لامپ قوس نورکربن ولامپ قوس نور بافشارقوی موجودبودند لیکن چون باند فرکانس آنهاخیلی وسیع است تجربه باآنها برای رسیدن به خواص غیرخطی بسیارمشکل بود • برای اینکه آثاربخوبی پدیدارگردندباید میزان عظیمی انرژی دربانداریکی متمرکزگردد بدون داشتن چنین تشعشع چسبیده بهم و یکرنگی احتمال اینکه دوموج بایکدیگرویاباماده فعل وانفعالی داشته باشند ممکن نیست •

باتکمیل لیزر درسال ۱۹۶۰ فیزیکدانهابه منبع نورانی ای که بتوان باآن آثاراپتیك غیرخطی رابررسی نمود دست یافتند • نور خروجی لیزر دربانداریکی متمرکزبوده

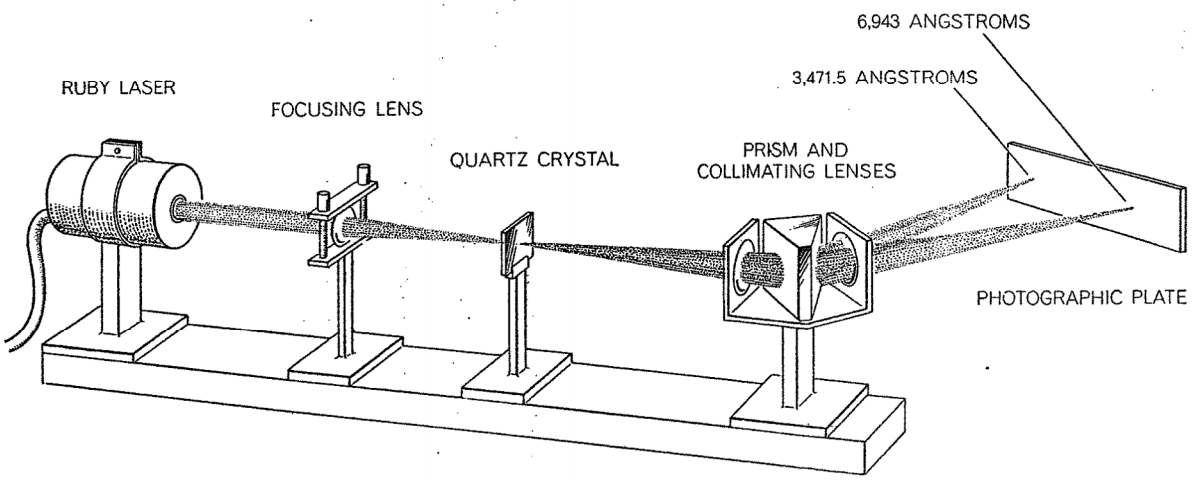


شکل ۱ ــ نورمافوق بنفش هارمونیک دوم هنگامی تولید میگردد که نورقرمزحاصل ازلیزریاقوتی به کریستال K D P پتاسیم دی هیدروژن فسفات بتابد • منبع شعاع لیزرکه دارای طول موج ۶۹۴۳ آنگستروم است در طرف راست عکس دیده میشود • آینهٔ گردانیکه درطرف راست عکس مشاهده میشود قسمتی ازمکانیسم لیزراست • آینهٔ کاملا منعکس کننده ای که درطرف چپ قراردارد کاملاً ثابت است• تاهنگامیکه دوآینهٔ ثابت وگردان موازی نشوند لیزرشروع بکارنخواهدکرد • اگراین مسیرتاهنگامیکه اتمهای تهییج شدهٔ میله‌یاقوتی لیزربه ماکزیمم میرسد بتعویق افتدعمل لیزرشدید خواهد شد • بین آینهٔ گردان وکریستال مثلثی K D P دیافراگم وصافی ای که بجزنورقرمزهیچ نورسوگردانی راعبورنمیدهد قرارارند • درکریستال حدود ۰/۱ درصد ازشعاع لیزربه نورمافوق بنفش باطول موج ۳۴۷۱/۵ آنگستروم که درست نصف طول موج اصلی است تبدیل میشود • یکمك یك صافی آبی رنگ که درطرف چپ کریستال قراردارد نورقرمزتبدیل نشده بخارج رانده میشود • هارمونیك دوم نور مافوق بنفش که دراینجابخوبی مشاهده میشودپس ازبرخورد به صفحهٔ فلوئورسانت درطرف چپ یك جرقهٔ درخشان ایجاد میکند • عکس فوق درلابراتوارمؤلف برداشته شده است •

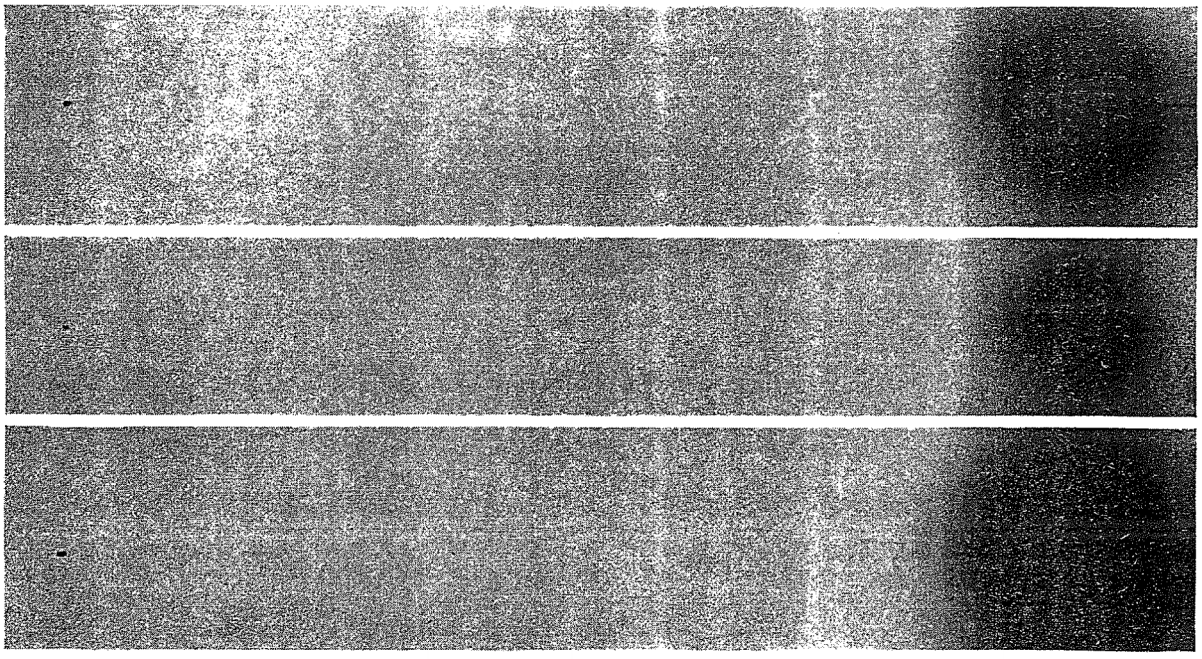
بشدت بیکدیگرچسبیده اند • درتابستان سال ۱۹۶۱ گروهی ازدانشمندان بسرپرستی Peter.A.Franken دردانشگاه میشیگان به تحقیق آثارغیرخطی نورپرداختند • آنها شعاعی ازلیزریاقوتی راکه یك پولس سه کیلوواتی نورقرمزباطول موج ۶۹۴۳ آنگستروم دفع میکرد به داخل یك کریستال کوارتزتاباندند • ازنوریکه به کریستال برخورد میکرد 10^{-8} قسمت آن بنور هارمونیك دوم آن که طول موجش ۳۴۷۱/۵ انگستروم است تبدیل میشد • این طول موج که درناحیهٔ ماوراءبنفش طیف قرارداشت برابر نصف طول موج نوراصلی ودرنتیجه فرکانسش دوبرابرآن بود • ازآنجاکه طول موج نورمزبور درست نصف طول موج نوراصلی میباشدوضمناً جهت انتشارآن درست درجهت نوراصلی است امکان اینکه اشعهٔ مزبوربواسطهٔ فلوئورسانس درداخل لیزربوجودآمده باشد رد میگردد • بسیاری ازتجربیات مربوطه انجام گرفته و

مقداری نتیجهٔ غیرمنتظره نیزعاید شـــد ۰ در آزمایشات مزبورراندمان تبدیل نورلیزربـــه هارمونیکهایش بیش از ۲۰٪ بود۰ بواسطهٔ فرآیند های غیرخطی نورچسبیده بهم صد هـا طول موج جدید درناحیهٔ ماوراء بنفش ومادون قرمزوناحیهٔ مرئی طیف بدست آمدند ۰ آثـــار غیرخطی اپتیك در راههای گوناگونی خود نمائی کردند ورشتهٔ جدیدی در اپتیك بوجود آمد ۰

برای درك چگونگی تولید هارمونیك نور در تجربهٔ گروه فرانکین لازم است چگونگی اثـر میدان الکتریکی نورلیزررا برالکترونهای کریستال کوارتزدرك کنیم ۰ اتم آزاد اتمی استکـــه از



شـکل ۲ــ اولین بار در سال ۱۹۶۱ در دانشگاه میشیگان توانستند باروش نوق امکان تولید نورمافوق بنفش رابکمك جرقهٔ شدید لیزریاقوتی اثبات کنند ۰ کریستال کوارتزتوانست فقط یك صد میلیونیم نورقرمزلیزررابه نورمافوق بنفش تبدیل کند ۰ درعبوراز منشورنورمافوق بنفش بیش ازنورقرمزلیزرخم میشود ودرنتیجه ازآن ها میتوان بطورجداگانه ای عکسبرداری نمود ۰



شکـل ۳ــ اولین عکسهای نورمافوق بنفش هارمونیك دوم توسط فرانکن وهمکارانش گرفته شد ۰ درهمهٔ حالات میزان مافوق بنفش (لکه های کوچك در ۳۴۷۱/۵ آنگستروم) کاملاً بامـــربع مقدارنوردرفرکانس ۶۹۴۳ متناسب است ۰

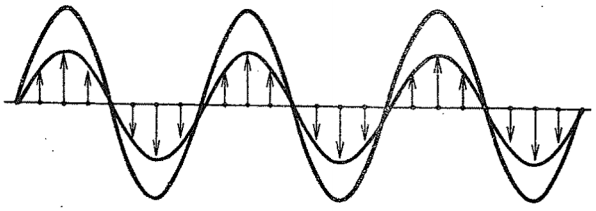
هسته ای با بارمثبت ویك یاچند الکترون که آنرا احاطه کرده اند تشکیل شده ودراتمهائی که الکترونهایشان ازدوتجاوزمیکنده الکترونها درچند پوستهٔ الکترونی قراردارند ۰واضح است که الکترونهای پوستهٔ خارجی بانیروی کمتری به اتم اتصال دارند وبآنها الکترونهای والانس گویند۰ هنگامیکه اتمی نزدیك اتم دیگری قرار دارد ممکن است الکترونهای والانس مشترك باشند ویااینکه ازیك اتم به اتم دیگرانتقال یابند این وضع درکریستالها بخوبی مشهوداست و نتیجهٔ فرآیند مزبوراینستکه پوستهٔ خارجی اتمهای مجاورکاملاً پُرمیشود ودرنتیجه بیکدیگر مربوط میگردند ۰

تعدادی ازکریستالها چون کلرورسدیم را یونی میگویند زیرا الکترونها ازاتمی که یك یا تعدادکمی الکترون دارد به اتم دیگرکه کمبود الکترون دارد میروند وپوستهٔ خارجی آنراتکمیل میکنند ۰ هم دهنده وهم گیرندهٔ الکترون دارای بارالکتریکی میشوندکه ازجهت علامت باهم اختلاف دارند ۰ این یونها خود بخود طوری درشبکه میگردندکه یونها باعلامت مخالف هرچه ممکن باشد بهم نزدیکترمیگردند ۰ زیراکه الکترونهای خارجی تر بین اتمها بشرکت گذاشته شده اند تاهمهٔ پوسته های خارجی پُر شوند ۰هردونوع کریستال یونی وکووالانس کاملاً خنثی هستند ۰

حال ببینیم وقتی موج نورمرئی به کریستال شفافی تابانده میشود چه حادث میگردد ؟ همانطوریکه قبلاً نیزذکرگردید یکی ازمؤلفه های موج نورمؤلفهٔ میدان الکتریکی متناوبی میباشد که دارای فرکانس زیاد است ۰ ازآنجاکه هسته خیلی سنگین است تأثیرمیدان مزبوربرآن بواسطهٔ فرکانس زیادی که دارد صفراست و ضمناً الکترونهای پوسته های داخلی نیزچون بانیروی زیادی باهسته ارتباط دارند تحت تأثیرمیدان مزبورقرارنمیگیرند۰لیکن الکترونهای والانس که بانیروی کمی به اتم بستگی دارند تحت اثرمیدان توزیع میگردند ۰ توزیع آنها همان پلاریزاسیون یاجابجائی بارمنفی در داخل کریستال است ۰ پلاریزاسیون مزبوررا نباید باپلاریزاسیونی که باگذاشتن یك صافی درسرراه نورحاصل میگرد داشتباه کرد ۰ این پلاریزاسیون حرکت نوسانی چگالی بارمنفی است که نتیجهٔ آن تولید جریان متناوب ضعیفی درفرکانس نورمیباشد ۰

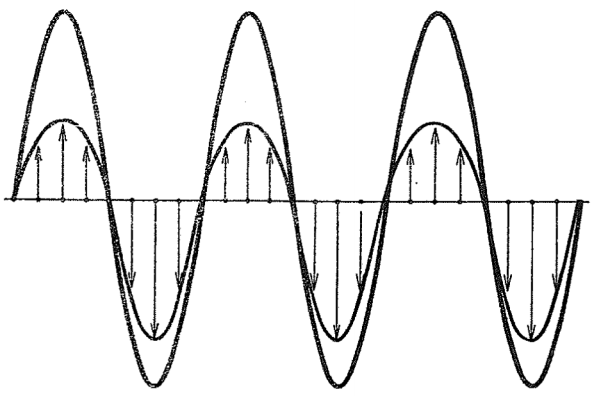
تاهنگامیکه میدان الکتریکی نوری نسبت بمیدانهای الکتریکی چسبنده داخل کریستال کوچك است جریان پلاریزاسیون کاملاً ازمیدان الکتریکی موج نورتبعیت میکند ۰ دراین مورد کریستال مثل یك آنتن کاملاً جهت دار Highly directional عمل میکندومحل موجی ازجریانی است که درکریستال گردش کرده دقیقاً بانوراول همفازبوده ودرجهت آن تشعشع مینماید ۰ انرژی موج نوربمیزان قابل توجهی تغییرنمیکنده تنهااثرپلاریزاسیون و تشعشع مجدد بعدی اینستکه سرعت نور رادر ماده کاهش دهند ۰

این وضع برای نورشدیدکاملاً متفاوت است



شکل ٤ ــ موج پلاریزه شدهٔ خطی هنگامی ایجاد میشود که نوری با شدت معمولی از محیط شفافی عبور کند • موج نور حامل یك میدان الکتریکی اپتیك (منحنی با دامنهٔ بیشتر) میباشد که سبب جابجائی متقارن در الکترونهای باند آزاد میشود (نقطه‌های سیاه) جابجائی به پیروی از میدان الکتریکی اپتیك حاصل میشود و یك موج پلاریزه شدهٔ اپتیك ایجاد میگردد و موج نورانی ٔ نوری با فرکانس خود شتشعشع میکند •

ٔ میدان الکتریکی نورجمع شده لیزرهای مخصوصی بمیزان ۱۰ میلیون (10^7) ولت بر سانتیمتر میرسد ٔ چنین میدانهای قوی ای با میدانهای الکتریکی درون کریستال که حدود 10^8 تا 10^{11} ولت برسانتیمتر است قابل قیاس میباشند • درنتیجه هنگامیکه اشعهٔ شدید لیزر وارد کریستال شفافی میگردد سبب میشود الکترونها بنحو عظیمی توزیع گردند و پلاریزاسیون حاصل دیگر متناسب با میدان الکتریکی نوری نخواهد بود • درحقیقت در میدانهای نوری حدود 10^7 ولت سانتیمتر بسیاری از مواد بکلی خورد میگردند •



شکل ٥ ــ موج پلاریزه شدهٔ غیرخطی هنگامی حاصل میگردد که نوری با شدت کافی از کریستالهای مخصوصی که دارای ساختمان یکطرفه (One-wayness) هستند عبور کند • بواسطهٔ ساختمان خاص کریستال های مزبور ٔ الکترونهای باند آزاد در اثر میدان الکتریکی اپتیك (منحنی با دامنهٔ بیشتر) در یك جهت بهتر از جهت دیگر حرکت میکنند • درنتیجه یك موج پلاریزه شدهٔ دیستورتی موجود میآید که بنوبهٔ خود سبب میگردد که نور شامل هارمونیك دوم یا هارمونیکهای دیگر از فرکانس موج اصلی باشد •

دیاگرام ساده شدهٔ شکل (٥) مشخصهٔ جواب را هنگام عبور یك جریان الکتریکی نوری شدید از یك مادهٔ غیرخطی ویا یونی نشان میدهد • دیاگرام مزبور نشان میدهد که میدان شدید جهت راست در مورد پلاریزه کردن این مواد از میدان در جهت چپ مؤثرتر است •

چنین وضعیتی هنگامی بوقوع می پیوندد که کریستال دارای ساختمان یکطرفه (One-wayess) باشد یا بهتر بگوئیم کریستالی باشد که مرکز تقارنی نداشته باشد • از کریستالهائی که در طبیعت یافت میشوند فقط ۱۰٪ جزو این گروهند و عموماً دارای خاصیت دی الکتریك میباشند یعنی هنگامیکه آنها را تحت تأثیر فشار مکانیکی قرار دهیم غیرمتقارن بودن آنها سبب «دیستورسیون» های غیرمتساوی در توزیع بار مثبت و منفی میگردد و ولتاژی در دو وجه کریستال ظاهر میشود •

موج دیستورتهٔ پلاریزاسیون که توسط اشعهٔ شدید لیزر تولید میشود با همان سرعت نور حرکت میکند • بعلاوه میتوان نشان داد که موج دیستورته برابر مجموع سه مؤلفه میباشد: یك موج اصلی با فرکانس f موج نورانی ــ یك موج با فرکانس هارمونیك دوم $2f$ ــ یك مؤلفه سوم که به جریان مستقیم یا پلاریزاسیون ثابت مربوط است •

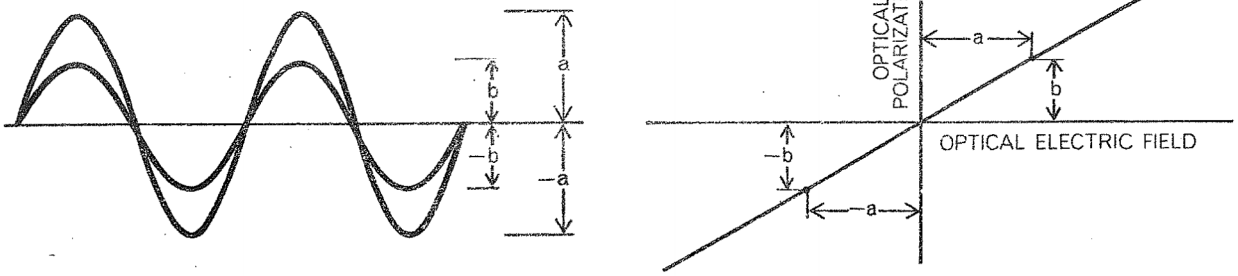
موج پلاریزاسیون هارمونیك دوم در حرکت از نور اصلی پیروی میکند و در همان جهت نوری با فرکانس $2f$ تشعشع مینماید • سرعت موج با فرکانس $2f$ در اغلب مواد چند درصد کمتر از سرعت

موج بافرکانس f است . این مطلب نشان میدهد که معمولاً ضریب انکسارمواد برای نور های بافرکانس زیاد بزرگتراز نوربافرکانس کم است وهمین تغییرضریب انکسارباعث بوجود آمدن طیف نورهنگام عبورنورسفید ازمنشورمیگردد. تغییرضریب انکساربا طول موج راپراکندگی عادی (Marian Goeppert Mayer) گویند .

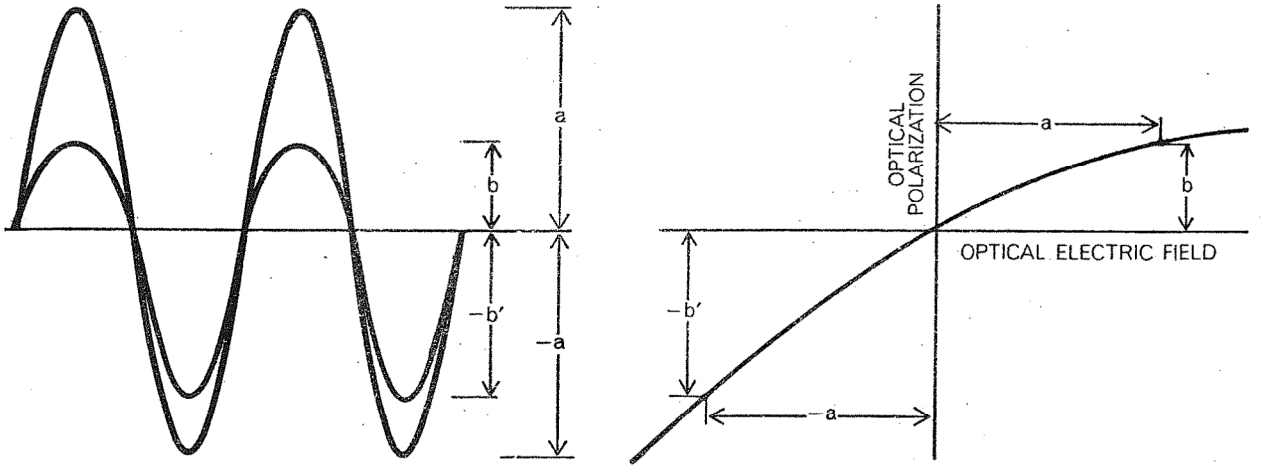
اختلاف سرعت بین نوراصلی fونور هارمونیك 2f یعنی اینکه نورهارمونیك تشعشع شده ازموج پلاریزاسیون 2f سرعتش کمی آهسته ترازخود موج پلاریزاسیون 2f میباشد. واضح است که نورمتشعشع شده ازموج پلاریزاسیون 2f بانوریکه کسری ازثانیه قبل از این نورتشعشع کرده اختلاف فازخواهند داشت ودوموج متشعشع شده شروع به تداخل مینمایند .فاصله ایکه لازم است تا موج پلاریزاسیون 2f ونورمتشعشع شده ازآن کاملاً خارج ازفازیکدیگرقرارگیرند «طول چسبندگی» نامیده میشود وحدود یکهزارم سانتیمتراست . اگرضخامت کریستال رابرابراین طول ویا مضرب زوجی ازآن انتخاب کنیم تشعشع هارمونیك کاملاً محومیگردد. درنتیجه تداخل معمولاً نمیتوان برای تولید هارمونیکها کریستالی طویلترازیکهزارم سانتیمتربکاربرد .

درعمل روشهای گوناگونی اتخاذ شده تابر این مشکل فائق آیند . یکی ازروشهای متداول بکاربردن کریستالهائیست که درآنها انکسار مضاعف صورت میگیرد .

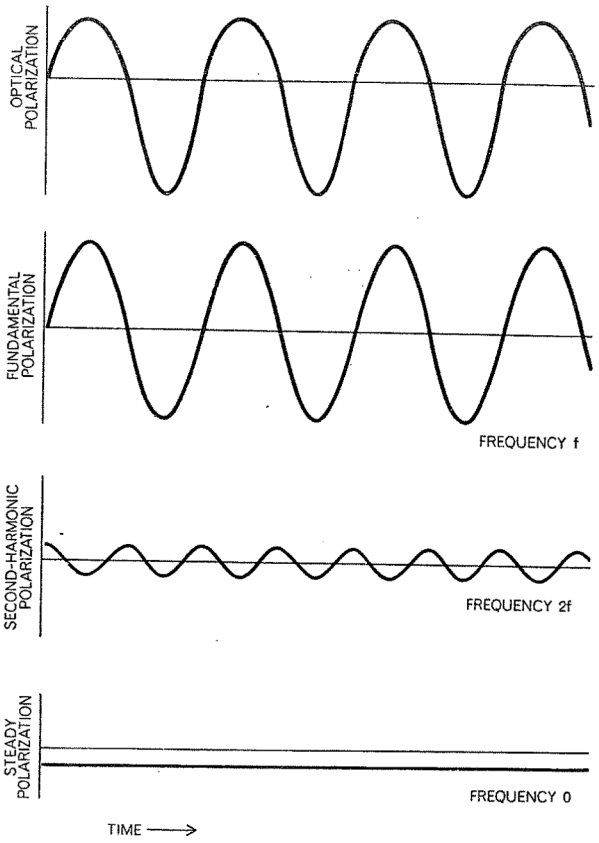
درکریستالهائیکه نوربادوسرعت مختلف عادی وغیرعادی میتواند حرکت کند انکسار



شکل ٦ــ اگرتأثرکریستال خطی باشد موج پلاریزه شده اپتیك (منحنی بادامنه کمتر) مستقیماً بامیدان الکتریکی اپتیك (منحنی بادامنه بیشتر) متناسب است واگرمقادیرمربوطه موج ومیدان راروی دومحور رنظربگیریم رابطه بین آنهاخط مستقیمی است که درشکل ملاحظه میگردد .

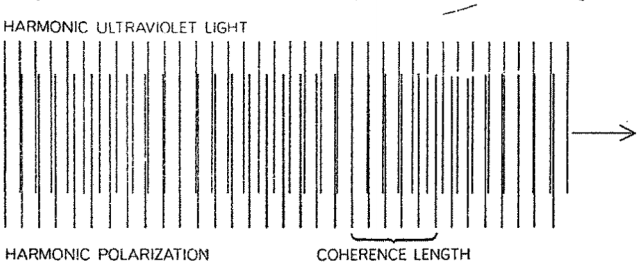


شکل ۷ــ هنگامیکه تأثرکریستال غیرخطی است موج پلاریزه شده (منحنی بادامنه کمتر) بامیدان الکتریکی اپتیك (منحنی بادامنه بیشتر) متناسب نیست واگرمقادیرمربوطه موج ومیدان راروی دو محور رنظربگیریم رابطه بین آنها دراینحالت منحنی ای غیرخطی میباشد .



شکل ۸ ــ تجزیهٔ یك موج پلاریزه نشان میدهد که ازمجموع سه مؤلفه تشکیل شده است :
۱ ــ موجی با فرکانس f که موجد موج پلاریزه است. ۲ ــ موجی با فرکانس هارمونیك دوم (2f) .
۳ ــ مؤلفه ای که مربوط بیك پلاریزاسیون ثابت است . مؤلفه های ۱ و ۲ نورخود را با فرکانس مربوطه شان که بترتیب f و 2f است تشعشع مینمایند . تقریباً در همهٔ مواد سرعت نور با فرکانس (2f) کمی ازسرعت نور با فرکانس (f) کمتر میباشد .

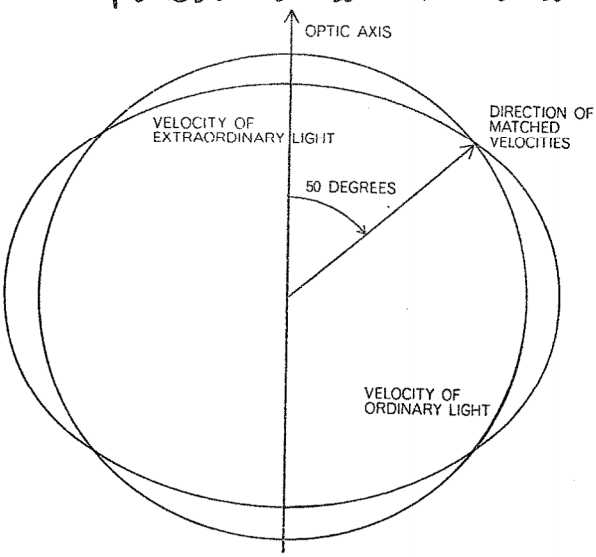
مضاعف صورت میگیرد این دسته ازکریستالها راکریستالهای غیرمتقارن «آسیمتریك» گویند و ازجمله این کریستالها کلسیت رامیتوان نام



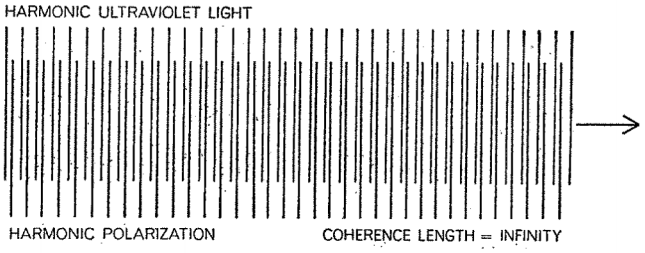
شکل ۹ ــ بخاطراینکه موج پلاریزه شده (خطوط پائینی) کمی تندتر ازهارمونیك (خطوط بالائی) خودحرکت میکند تداخل مخرّب حاصل میشود .

برد. درشکل (۱۰) سرعتهای عادی وغیرعادی برای کریستال پتاسیم دی هیدرژن فسفات KDP که کریستالیست پیزوالکتریك تشریح شده اند . دیاگرام نشان میدهدکه درزاویهٔ ۵۰ درجه نسبت به محوراپتیك کریستال نور اصلی (۶۹۴۳ آنگستروم) سرعتش برابر نور هارمونیك (۳۴۷۱/۵ آنگستروم) است . در این جهت تأخیرنورماوراءبنفش بخاطر پراکندگی با ازدیاد سرعت آن (دراین جهت نورماوراءبنفش با سرعت غیرعادی حرکت میکند) جبران میگردد . درتکنیك مزبورطول چسبندگی ازیکهزارم سانتیمتربه بیش ازیك سانتیمتر رسیده وهمچنین راندمان تبدیل نوربمیزان وسیعی افزایش یافته است . گروهی از دانشمندان با استفاده ازکریستال KDP راندمان تبدیل نورقرمزلیزری بافرمان یك میلیون واتی رابه نورماوراءبنفش بمیزان ۲۰٪ رساندند . گروه دیگری بکمك یك لیزرگازی مداوم ویکنواخت ۵۰ میلیونیم واتی وبابکاربردن کریستال KDP هارمونیکها رابوجود آوردند .

درلابراتوارتلفن بل برای اجتناب ازمسئلهٔ تداخل روش دیگری نیزاتخاذگردیدکه در مورد کریستالهای فروالکتریك چون باریم تایتانات



شکل ۱۰ ــ باتولید نورهارمونیك درکریستالی چون KDP که درآن انکسارمضاعف صورت میگیرد میتوان بر پدیدهٔ تداخل غلبه کرد . دایره نشان دهندهٔ سرعت نور ۶۹۴۳ آنگستروم لیزرياقوتی که عمود برصفحهٔ شکل پلاریزه شده است میباشد . بیضی نشان دهندهٔ سرعت نور هارمونیك دوم ۳۴۷۱/۵ آنگستروم میباشدکه درصفحهٔ شکل پلاریزه شده است . درزاویهٔ ۵۰ درجه نسبت به محوراپتیك دوموج بایك سرعت حرکت میکنند .



شکل ۱۱ــ بافرستادن شعاع یك لیزریاقوی بداخل کریستال K D P بازاویهٔ ۵۰ درجه نسبت‌به محوراپتیك تداخل موج ازبین میرود ۰ اکنون موج پلاریزه شده (خطوط پائینی) وهارمونیك نوراوراء بنفش (خطوط بالائی) باهم همقدم تشعشع میکنند ۰

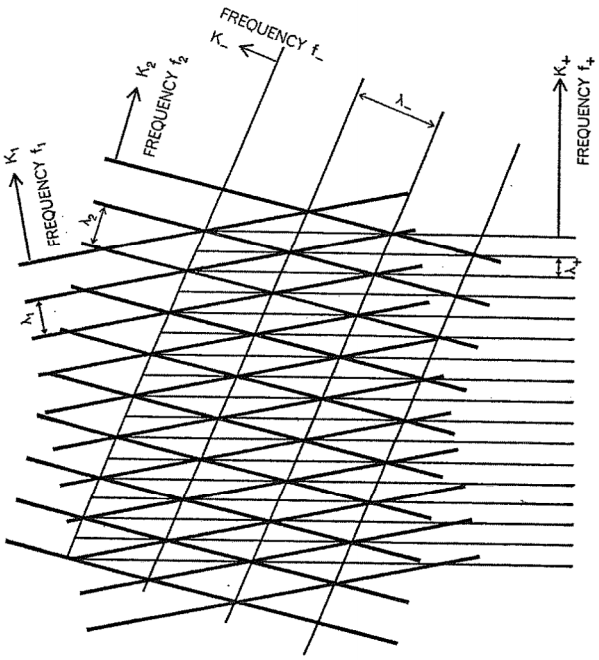
قابل اجراست۰ کریستالهای فرّوالکتریك از مجموعه ای ازطبقات باخواص مختلف تشکیل شده اند ۰ درتایتانات باریم طبقات متصل بهم کاملاً معادلند بجزاینکه نسبت بهم معکوس قرارگرفته اند ۰ بخاطرمعکوس قرار گرفتن محورهای طبقات متوالی فازهارمونیك های تولید شده درنواحی متوالی معکوس میگردد ودرنتیجه اثرتداخل تااندازه‌ای ازبین میرود وتولید هارمونیك بنحوبارزی افزایش می یابد ۰ اگرصفحات کوارتزراطوری روی هم قراردهیم که محورهایشان درجهات متناوبی قرارگیرند نیزاین افزایش هارمونیك ملاحظه میگردد ۰

«جریان مستقیم» پلاریزاسیون که قبلاً بعنوان مؤلفهٔ سوم موج پلاریزاسیون دیستورته ذکرگردید وبااشعهٔ شدید لیزرتولید میگردد نیز مورد بررسی قرارگرفت ۰ علامت جریان مستقیم رابااتصال صفحات کوارتزدرجهات مخالف وقراردادنشان درمحلی که اشعهٔ خروجی لیزر ازآنهابگذرد بآسانی میتوان تحقیق کرد۰ علامت جریان مستقیم مثل پولس ولتاژی متناسب باشدت نورلیزرظاهرمیشود ۰ دراین تجربه عمل کریستال متشابه باعمل لامپ دید خلاء (یاکریستالی) درمورد یکسوسازی و دتکسیون امواج رادیوئی میباشد ۰

ازجمله تئوریهای جدید تحلیل فعل و انفعال دوموج نورانی بافرکانسهای مختلف که درجهات مختلف دریك کریستال شفاف فرستاده شده باشند میباشد ۰ اگراشعهٔ مزبور اشعهٔ چسبیده ویکرنگی باشند بایکدیگرفعل و انفعالی خواهند داشت ونتیجهٔ عمل امواجی بافرکانسهای مجموع ویاتفاضل دونوراول میباشد۰ درتجربه ای ازفعل وانفعال نورسبزبطول موج ۵۴۶۱ آنگستروم حاصل ازقوس نورلامپ جیوه ونورقرمزبطول موج ۶۹۴۳ آنگستروم نوری‌بطول موج ۳۰۵۶ آنگستروم حاصل گردید ۰ باکمی محاسبه مشهوداست که مجموع فرکانسهای نور اول ودوم برابرفرکانس نورمنتجه است ۰

درشکل ۱۲ جمع شدن فرکانسهابخوبی توضیح داده شده است ۰ شمای مزبوررا شمای moiré گویند ۰ دراین شمانقاط برخورد نقاط ماکزیمم قدرت میدان الکتریکی رامشخص میکنند ۰ دودسته خطی که ازنقاط ماکزیمم میگذرند نمایندهٔ امواج پلاریزاسیون جدید غیرخطی میباشند ۰ دراین شماملاحظه میگردد که فرکانس یکی ازآنهابرابرمجموع فرکانسهای دوموج اول وفرکانس دیگری برابرتفاضل دو موج اول میباشد ۰

درشمای مذکوربُرد ارK تعریف میشودکه جهت آن منطبق برجهت موج وطول آن متناسب بافرکانس موج میباشد ۰ بُرد ارK رابُرد ارانتشار میگویند ۰ ازتعریف بُرد ارانتشارنتیجه میگردد



شکل ۱۲ ــ شماهای Moire بافعل وانفعال دوموج نورانی بافرکانس های مختلف ایجاد میگردند • فرکانسهاوطول موجهای امواج مزبور رابترتیب f_1 و f_2 و λ_1 و λ_2 مینامیم • بردار های انتشارآنهابترتیب K_1 و K_2 فرض میشود که جهت آنها درجهت حرکت موج مربوطه وطولشان متناسب باعکس طول موج مربوطه درنظرگرفته میشود • نقاطیکه درآنها امواج برخورد میکنند نواحی ماکزیمم میدان الکتریکی رانشان میدهند • خطوط مساوره ایکه ازاین نقاط ماکزیمم میگذرند نشان دهنده‌ٔ دوموج پلاریزه شده‌ٔ غیرخطی جدیدی هستندکه نورتشعشع میکنند • یکی ازامواج نوری بافرکانس f_+ تشعشع میکندکه فرکانسش برابرحاصل جمع f_1 و f_2 است وموج دیگرنوری بافرکانس f_- تشعشع میکندکه فرکانسش برابرحاصل تفریق دوفرکانس f_1 و f_2 میباشد • بردارهای K_+ و K_- جدید نیزبهمان ترتیب ازحاصلجمع وتفریق دوبردار K_1 و K_2 حاصل میشوند •

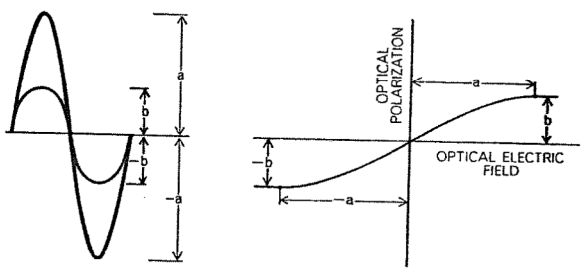
که بُردارانتشارامواج حاصل بترتیب برابر مجموع وتفاضل بُردارهای انتشارامواج اولیه میباشد •

طبق تئوری کوانتم فرکانس موج نورانی متناسب باانرژی فوتون آن موج وبُردارانتشار آن متناسب باومنتوم فوتون موج مورد نظر میباشد •

دربرخورد دوفوتون باید قانون بقای مومنتم و انرژی برقرارباشد • در فعل وانفعال دوموج اگرفرکانس موج حاصل برابرمجموع فرکانسهای امواج اولیه باشد بایدگفت که درایـن فعل وانفعال ازبرخورد دوفوتون اول فوتون جدیدی بوجود آمده که انرژی ومومنتش برابر مجموع انرژی ومومنتم فوتونهای اولیه است •

درحالتیکه فرکانس موج حاصل برابرتفاضل فرکانسهای امواج اولیه میباشد نیزمیتوان قانون بقای مومنتوم وانرژی راتوضیح داد • فرض میکنیم دوفوتون اولیه دارای فرکانسهای f_1 و f_2 باشند وفوتون حاصل فرکانسش f_3 باشدکه f_3 برابر f_1-f_2 است • دراین فعل وانفعال فقط فوتون بافرکانس f_1 نابود میگردد ودرنتیجه یک فوتون f_3 ویک فوتون f_2 حاصل میگردد • درتبدیل فوتون f_1 به f_2 فوتون f_1 انرژی اضافی راصرف تولید فوتون f_3 میکند • باینترتیب دراین فعل و انفعال تعداد فوتونهای تولید شده‌ٔ f_2 برابر تعداد فوتونهای تولید شده‌ٔ f_3 است لیکن ازآنجاکه تعداد آنها نسبت به تعداد فوتون های f_2 موجود درنوراصلی خیلی کم است نمیتوان آنهارادرآزمایش بدقت تعیین نمود •

درتمام تجربیات فوق برای بررسی آثار اپتیک غیرخطی ازکریستالهای غیرمتقارن استفاده‌شده است • شاید سؤال شودکه آیا میتوان چنین اثری رادرکریستالهای متقارن ومواد ایزوتوپ چون شیشه ومایعات ملاحظه



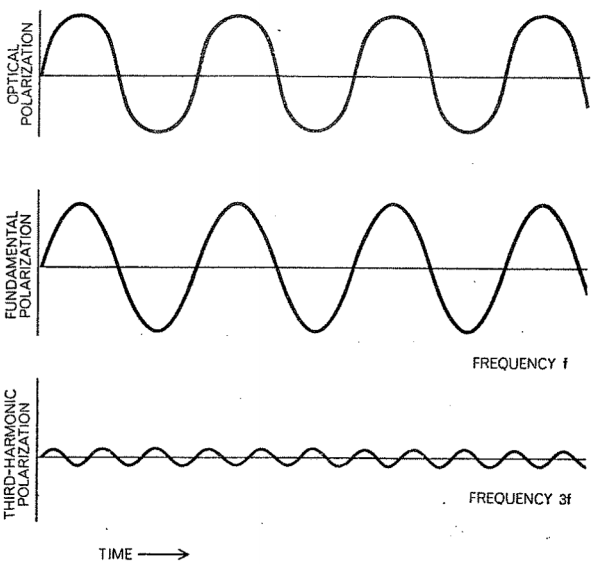
شکل ۱۳ ــ موج پلاریزاسیون غیرخطی رامیتوان علاوه برکریستالهای غیرمتقارن درکریستال های متقارن ومایعات بوجود آورد • درطرف راست موج پلاریزاسیون نسبت به میدان الکتریکی اپتیک رسم شده است • مؤلفه های موج پلاریزاسیون درشکل ۱۴ رسم شده است•

کرد ؟ جواب مثبت است وهمهٔ مواد باموجود بودن میدانهای کاملاً شدیدهٔ غیرخطی هستند لیکن آثارمربوطه ازآثاریکه درکریستال های غیرمتقارن مشاهده میشوند خیلی ضعیفتر میباشند ۰

چون کریستالهای متقارن خاصیت یکراهگی (Onewayness) ندارند امواج پلاریزاسیون که ازشعاع نورشدید حاصل شده اند ازچپ و راست تفاوتی ندارند وبارهای الکتریکی ماده بطورمساوی بچپ وراست جابجامیگردند ۰ لیکن غیرخطی بودن ناشی ازاین حقیقت است که جابجائی کاملاً ازمیدان الکتریکی ماکزیمم تبعیت نمیکند ۰ تجربه نشان داد که موج پلاریزاسیون دیستورته شامل یك موج سینوسی خالص با فرکانس موج اصلی ویك موج ضعیف با هارمونیك سوم میباشد ۰ هارمونیك سوم نورلیزریاقوتی ۶۹۴۳ آنگستروم درقسمت ماوراء بنفش قرار دارد که طول موج آن ۲۳۱۴ آنگستروم است ۰ درتجربه ایکه انجام گرفت راندمان تبدیل ۳ میلیونیم بود ۰

بواسطهٔ میدانهای شدید نورلیزرانتقال انعکاس وانکسارآن ازقوانین کلاسیك پیروی نمیکنند ۰ درچنین شدتهائی باید قوانین انعکاس وتداخل عمومیت داده شوند وتولید هارمونیکها درسطوح راشامل گردند ۰

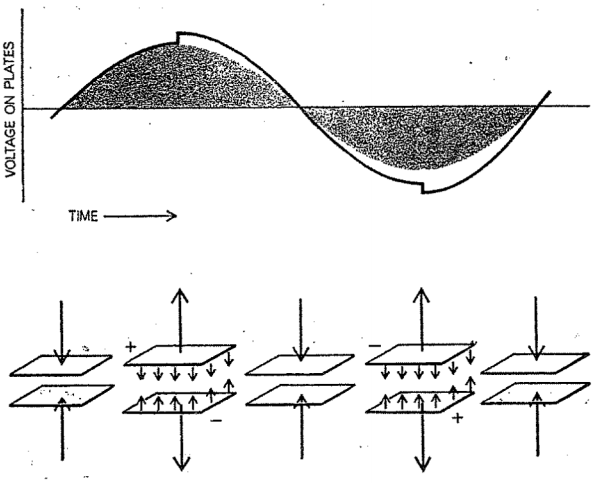
درشدتهای زیاد جذب نورنیزمطالب جدیدی بوجود میآورد ۰ تحقیقاتیکه دراینمورد صورت گرفته نشان داده اند که مواد شفافیکه نوربافرکانس ν راجذب میکنند درشدتهای زیاده ٔنورفرکانس $\nu/2$ راجذب مینمایند ۰ در این فرآیند دوفوتون باهم جذب اتمی میگردند وازاتم تحریك شده یك فوتون بافرکانسی برابر فوتون های اولیه دفع میگردد ۰ (این فرآیند قبلاً بطورتئوریك درسال ۱۹۳۱ بوسیلهٔ Maria Goeppert Mayer پیش بینی شده بود۰ اوکسیست که برای کارهایش درمورد ساختمان هستهٔ اتم درسال ۱۹۶۳ برندهٔ جایزهٔ نوبل گردید) تحقیقات بیشتری نشان دادند که بیشترمواد شفاف درمقابل نورشدید لیزروبخاطر آثارغیرخطی کدرمیباشند ۰ فرآیند جذب دو فوتون اطلاعاتی راجع به حالات تحریك شده اتمهای مواد جامد بدست دادند که بنا اسپکتروسکوپی معمولی قابل تحقیق نبودند ۰



شکل ۱۴ــ موج دیستورته که بوسیلهٔ نورشدید درمحیط سیمتریك (متقارن) بوجود آمده را میتوان به دوموْلفه تجزیه نمود یك موج بافرکانس اصلی ν ویك موج درهارمونیك سوم بفرکانس 3ν بادامنهٔ کم ۰

یکی ازکاربردهای جالبترلیزرتولید تشعشعات مادون قرمزاست ۰ ناحیهٔ مادون قرمزکه برای اسپکتروسکوپیستها بسیارجالب است بخاطرعدم وجود منابع قوی نورد راین باند

فرکانس تحقیق نشده باقی مانده بود. لیکن لیزرها با فرآیندهای غیرخطّیشان جبران این نقیصه را نمودند. اصلی که در اینمورد پیشنهاد شد فرآیند «پارامتریك» بود که در شکل (۱۵)



شکل ۱۵ــ اصل تقویت کننده «پارامتریك» راهی را پیشنهاد میکند که طبق آن میتوان نور قابل رؤیت لیزر را برای ایجاد نور شدید در ناحیهٔ مادون قرمز بدست آورد. در دیاگرام بسادور کردن صفحات هنگام ماکزیمم بودن ولتاژبین آنها و بازگرداندنشان بموقعیت اول هنگامیکه ولتاژبین آنها صفر باشد بتقویت ولتاژبینشان پرداخته ایم. میدانیم هنگامیکه ولتاژبین آنها ازصفر بیشتراست صفحات با نیروئی بهم جذب میگردند وکشش ما باعث میگردد که انرژی مکانیکی ما تبدیل بانرژی الکتریکی گردد. اگرنوسان صفحات با فرکانس f صورت گیرد علامت الکتریکی در فرکانسی برابر نصف f تقویت میگردد.

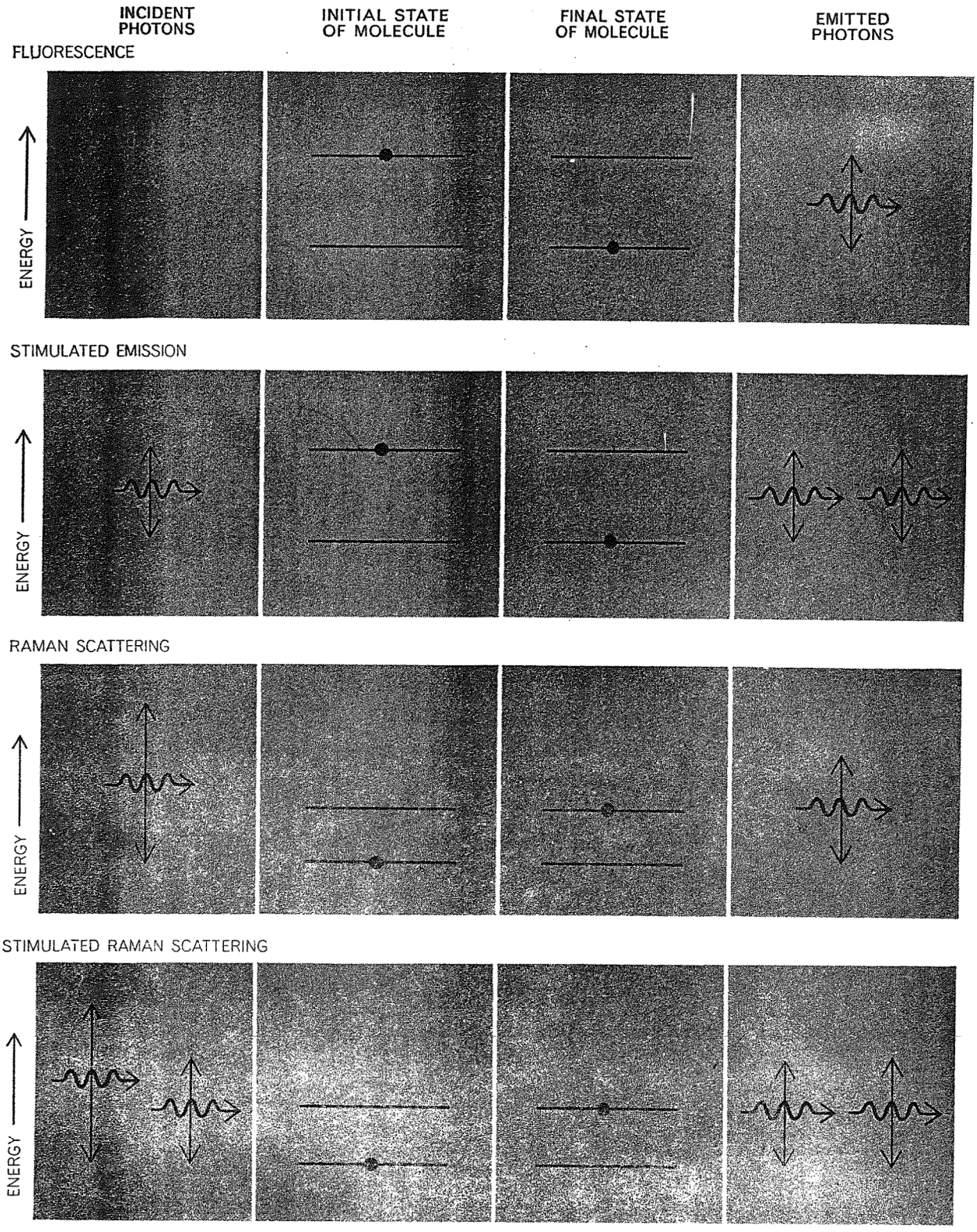
تشریح شده است ونشان میدهد که چگونه بوسیلهٔ خازنی میتوان ولتاژ را تقویت نمود. اگر هنگامیکه ولتاژ مقدار ماکزیمم خود را دارد و به شدت صفحات را بهم جذب میکند آنها را ازهم دور کنیم وهنگامیکه ولتاژ صفر است آنها را بحالت اول خود بازگردانیم کار مکانیکی ما باعث تقویت ولتاژ میگردد. در مورد نور لیزر صفحات دی الکتریك جایگزین صفحات هادی خازنها میگردند. تغییر پریودیك ثابت دی الکتریك نیز همان عمل حرکت پریودیك صفحات را انجام میدهد.

توجه کنید که اگر فرکانس دور ونزدیك کردن صفحات ازهم f باشد ولتاژ تقویت شده دارای دارای فرکانس f/2 خواهد بود ومهمتر آنکه میتوان نوری را با فرکانس f تابانده ودوده نور تقویت شده با فرکانس های f_1 و f_2 که مجموعاً برابر f هستند بدست آورد. بسیاری از لاسرها میکوشند که زوج نورهائی با شدت زیاد بدست آورند که با فرکانسهای مختلفهٔ آنها همهٔ باند فرکانس مادون قرمز پوشیده گردد.

در سال ۱۹۶۲ انتشار تحریك شدهٔ «رامان» کشف گردید و از روش مزبور لیزری ساختند که کاربرد عملی یافته است. در اندازه گیری دقیق نور منتشر شده از یك لیزر یاقوتی یك میلیون واتی ملاحظه گردید که ۱۰٪ از نوریکه انتظار میرفت در طول موج ۶۹۴۳ آنگستروم ظاهر گردد کم شده است. ولی بزودی دریافتند که نور مزبور در طول موج بیشتری یعنی ۷۶۶۰ آنگستروم ظاهر میگردد. (توضیح: شکل ۱۷ را ملاحظه نمائید)

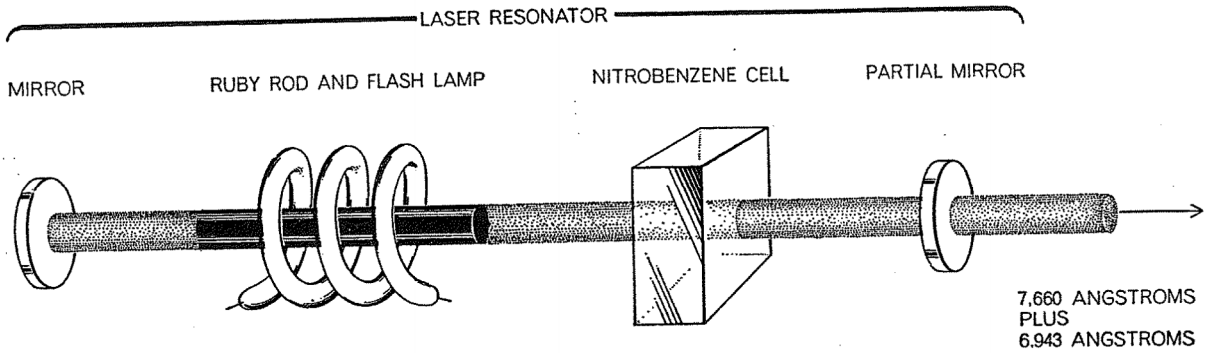
اختلاف فرکانس موج جدید با نور لیزر 4×10^{13} cps بود. بعداً تشخیص داده شد که این اختلاف عبارت از نوسان مشخصهٔ مولکول نیتروبنزن است. گرچه انتشار لیزر رامان چند سال قبل توسط «دکتر علی جوان» پیش بینی شده بود لیکن اتفاق مزبور که باعث کشف عملی این پدیده گردید مورد توجه بسیار فیزیکدانان قرار گرفت.

در اثر رامان یك فوتون بوسیلهٔ مولکول جذب میگردد و در فرکانس پائینتری انتشار می یابد و انرژی باقیمانده بصورت انرژی مکانیکی با نوسان یا چرخش مولکول ظاهر میگردد. حال اگر تعداد

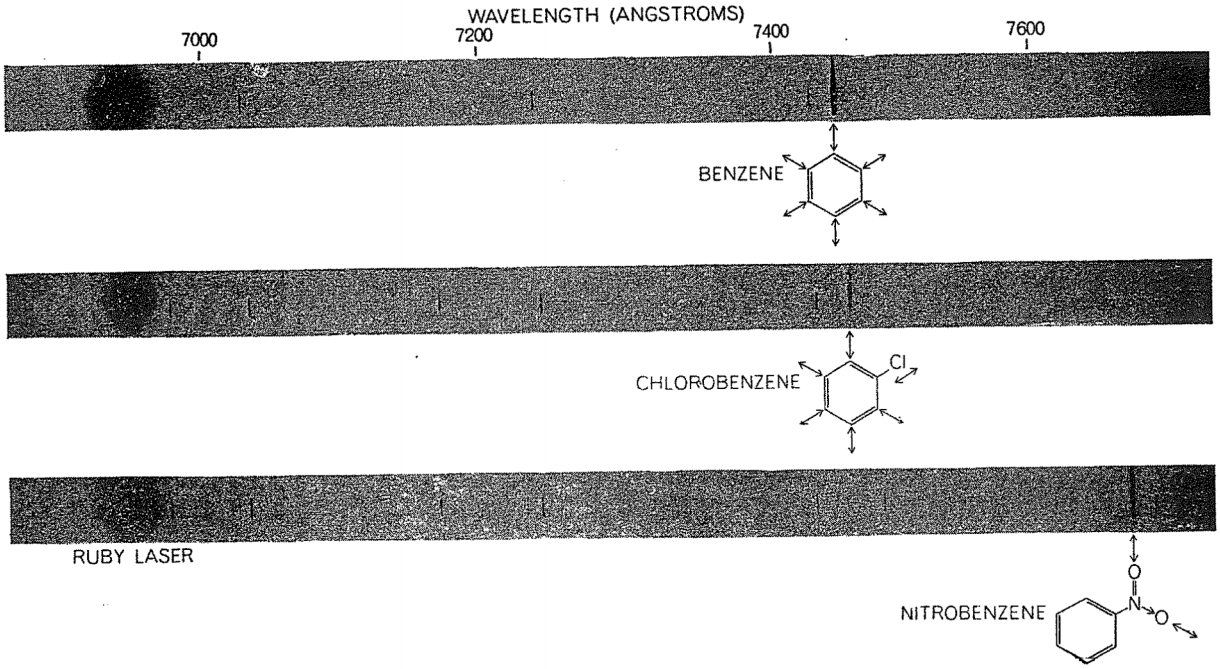


شکل ۱۶ ــ انتقال اتم یا مولکول تهییج شده ای ازحالتی بحالت دیگرازجمله فرآیندهای تشعشعی میباشد • درفلئورسانس فوتونی خود بخود انتشارمی یابدکه انرژیش معادل انرژی ایست که مولکول ازدست داده است • درانتشارتحریك شده فوتونی باانرژی ای درست برابرانرژی تهییج مولکولی باعث میشودکه آن مولکول فوتونی مشابه فوتون تحریك کننده منتشرنماید • درحالتیکه تعدادزیادی مولکول تهییج شده موجود باشدعمل زنجیری یاعمل لیزری میتواندحادث گردد • درتفرّق رامان مولکولی که دریك حالت de-excited میباشد فوتونی باانرژی غیرمخصوص جذب مینمایدودوباره آنراپس ازکم کردن انرژی مولکولیش دفع مینماید • درتفرّق تحریك شده رامان یك فوتون متفرق شده باوجودفوتونی باهمان انرژی حاصل میگردد ودراینمورد نیزامکان وقوع عمل زنجیری موجوداست •

فوتونهافراوان باشدویاایجادیك رزوناتور ازفرارآنهاجلوگیری بعمل آیدبه انتشارتحریك شده رامان میپردازد • (درشکل ۱۶ توضیح داده شده است)• این تحریك مشابه تقویت



شکل ۱۷ــ عمل لیزر رامان شکل تکثیرشده ای ازاثریست که اولین بار C.V.Raman درسال ۱۹۲۷ کشف کرد • دراین اثرفوتون نورانی ای توسط مولکولی جذب میگردد ودرفرکانس پائینتری انتشار می یابد • دردیاگرام فوق فوتون های لیزربطول موج ۶۹۴۳ آنگستروم درنیتروبنزن بعقب وجلومنعکس میگردند وپس از ازدست دادن مقداری انرژی شعاعی بطول موج ۷۶۶۰ آنگستروم ظاهر میشود • عمل لیزر رامان در ۱۹۶۲ بوسیله Eric.J.Woodbury,Won.K.Ng کشف گردید •



شکل ۱۸ــ طیف های تحریک شده رامان برای سه مولکول مختلف نشان داده شده اند • هرمولکولی تمایل دارد که فقط دریک بادوقیم بسمارقوی خودنوسان نماید • خطوط باریک مختلفی که مشاهده میگردند مربوط به موادیست که برای دهانه دوربین بکاررفته اند • انتشاررامان دومولکول بالائی نوسان سنکرون حلقه بنزنی رانشان میدهد • نوسان طیف پائینی مشخصه گروههای (No_2) است که به حلقه بنزنی اتصال دارند •

نورد رلیزریست • بااین تفاوت که تحریك قبلی مولکولها لازم نیست • بااین ترتیب درفعل و انفعال زنجیری که تعقیب میگردد کسربزرگی ازنورتبدیل به نورراما ن بافرکانس پائین تر میگردد • دراثرفوق میتوان ازطیف رامان عکسبرداری نمود زیرازمان نمایش طیف بمیزان زیادی افزایش می یابد درحالیکه درلیزرها مدت وجود طیف یك ده بیلیونیم ثانیه بود •

چندی پیش کشف شدکه هنگام تابا ندن پولسهانورشدید لیزربرجامدات، مایعات و گازهای بافشارزیاد فرآیند رامان بدون استفاده ازرزوناتورنیزقابل حدوث است • درنزدیکی کانون یعنی جائیکه شدت نورازیك میلیون وات درسانتیمترتجاوزمینماید تقویت نورراما ن 10^{50} درهرسانتیمتراست وکافیست که نورسرگردانی با یك بارعبورازکانون بسطح انرژی ۱۰۰۰۰۰ وات

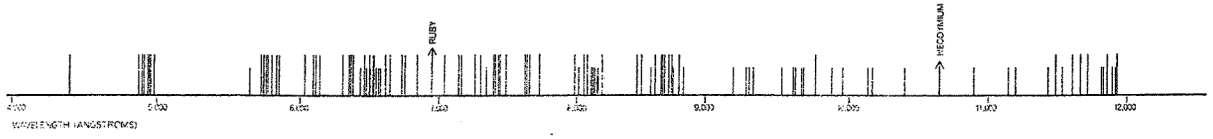
برسد ۰

صورت جدید تجربیات نورمجتمع نوسانات تحریک شدهٔ شدید دراثررامان میباشد که ضریب انکسارمواد رابافرکانسی برابرفرکانس نوسان مولکولی به نوسان وامیدارد ۰ با گذراندن نوری ازکانون دراین فرکانس مدولاسیون فرکانس خواهیم داشت ۰فرکانس مشخصهٔ مولکول بافرکانس نورجمع وتفریق شده وباندهای کناری رابوجود میآورد که نشان ـ دهندهٔ میزان تغییرات فرکانس میباشند ۰ با کمك قانون بقاءمومنتوم میتوان تغییرات فرکانس اتعیین کرد ۰ موادگوناگونی که تحت اثررامان قرارگرفته اندصدها منبع جدید نوربا شدت قابل توجه درسراسرطیف ماوراء بنفش تا مادون قرمزبوجودآوردند ۰ (شکل ۱۹)

چندی پیش یکی ازدانشمندان در MIT پیش بینی نمودکه دراثری مشابه اثررامان میتوان امواجی بافرکانس صوتی زیادوشدت فراوان تولید نمود ۰ دراین فرآیند انرژی باقیماندهٔ دراتم تبدیل به کوانتم صوت میگردد۰

آثاریکه درفوق تشویح گردید فعل وانفعال نوربانورراد رمحیط مادی نشان میدهند ۰ لیکن این تصوروجود داردکه اشعهٔ نورانی در خلاء نیزبایکدیگرفعل وانفعالی داشته باشنده ازنظرالکترودینامیك کوانتومی خلاء محیطی است قابل پلاریزه شدن که ضریب انکسارش از (۱) مقدارخیلی کمی کوچکتراست ۰فوتونهای شعاع گامادرخلاءباهم ترکیب شده ودرصورتیکه باندازهٔ کافی انرژی داشته باشند (حدودیك میلیون الکترون ولت) زوجهای الکترون ـ پوزیترون ایجاد میکنند ۰ گرچه فوتونهای نورانی که دارای انرژی ای حدودیك تاسه الکترون ولت هستند نمیتوانند زوجهای الکترون پوزیترون ایجاد نمایند لیکن دراثربرخورد دوفوتون نورانی دوزوج مجازی بوجود میآید ۰ چنین زوجی رافقط زمانی میتوان ملاحظه کردکه باهم ترکیب شده وبه فوتونهائی که مجموع انرژیشان برابرمجموع انرژی فوتونهای اول است تجزیه گردند ۰ ودرجهاتی غیرازجهات فوتونهای اولیه میروند ۰ این نوع تفرّق طوری حادث میشودکه گوئی ضریب انکسارخلاء دراثر میدان مغناطیسی والکتریکی نورتغییرمیکند۰ برآورد میشودکه ملاحظهٔ این تفرّق بالیزرهای موجود بسیارمشکل است ۰

تجربیات خطی ای که تاکنون انجام شده تکنیکهای جدیدی بوجودآورده اندکه در اسپکتروسکپی کاربُرد فراوانی دارند ۰ وامید میرودکه بکمك لیزرهاوالکترونیك ورادیوتکنیك بتوان سراسرطیف اشعهٔ الکترو مغناطیس را مورد استفاده قراردادد ۰



شکل ۱۹ ـ بوسیلهٔ عمل لیزر رامان بیش از ۱۰۰ منبع نورشدید تولید شده است ۰ خطوط بلند طول موجهائی راکه بابکاربردن پولسهائی ازلیزریاقوتی بدست آمده اند وخطوط کوتاهترطول موج های حاصل ازلیزر neodymium رانشان میدهند ۰ یافعل وانفعال این منابع درکریستالهای غیرخطی K D P که درآن فرکانسهاجمع وتفریق میگردند میتوان بیش از ۵۰۰۰ منبع نوریاطول موجهای مختلف بدست آوردکه درتحقیقات طیف نگاری بسیارمفید هستند ۰