شیوه‌های مختلف تابش‌دهی کوانتومی: مفاهیم و کاربردها در مترولوژی و حسگری

INC29-1387

نرگس کفائی[۱]، عطاملک قربانزاده[۲،۱]*

آزمایشگاه اپتیک کوانتومی، مؤسسه علوم و فناوری‌های کوانتومی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
آزمایشگاه تحقیقاتی لیزر، دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران، کد پستی ۱۴۳۹۹۵۵۹۶، تهران، ایران

چکیده:

برهم‌کنش نور با محیط‌های غیرخطی به نورهای غیرکلاسیکی منجر می‌شود که خصوصیاتی متفاوت از نور متداول دارند. این نورها دارای نوفه‌ی ذاتی کمتری نسبت به نور کلاسیک هستند. حالت‌های چگالیده‌ی نوری و هم‌چنین زوج‌های فوتونی درهم‌تنیده، از آن دسته از نورهای غیرکلاسیکی هستند که کاربردهای جدید زیادی در حوزه‌ی تابش‌دهی را سبب شده‌اند. مثلاً با استفاده از حالتی چگالیده از نور و تزریق آن در یک تداخل‌سنج چند کیلومتری، امواج بسیار ضعیف گرانشی معادل جابه‌جایی خیره‌کننده در حد 10^{-19}m ثبت شده است. اما، زوج‌های فوتونی درهم‌تنیده به مهم‌ترین ابزار برای فناوری‌های نوظهور کوانتومی تبدیل شده‌اند. ارتباطات از راه دور کوانتومی، رادار و لیدار کوانتومی، تصویربرداری ویدیویی با تمایز بالا و طیف‌نگاری با زوج، تنها نمونه‌هایی از شیوه‌های مختلف تابش‌دهی کوانتومی هستند. مزیت کوانتومی در حسگری، ممکن است سبب گردد تا بتوان یک پرنده در دوردست را که گم در مه و نوفه است تصویربرداری کرد. ساخت آشکارسازهای تک فوتونی به‌خصوص از نوع آرایه‌ای آن در سال‌های اخیر نیز به ظهور این فناوری‌ها کمک کرده است. البته، نرخ کم منابع تولید زوج‌های نوری هم‌بسته (۱۰^۴–۱۰^۸ فوتون در ثانیه)، به‌خصوص برای سنجش‌های از راه دور، فرآیندها را کند می‌سازد. با این وجود، ثبت سیگنال‌های بسیار ضعیف (با نرخ کسری از فوتون در ثانیه) و در حضور زمینه‌ای قوی از نوفه عملی شده است. در مقاله‌ی حاضر، ضمن توصیف فناوری‌های کوانتومی و چشم‌انداز کاربردهای آن‌ها، چالش‌های این فناوری‌ها در حوزه‌ی حسگری به‌خصوص از راه دور بررسی خواهند شد. در پایان به فعالیت‌های آزمایشگاه اپتیک کوانتومی دانشگاه تهران نیز اشاره خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: فناوری کوانتومی، زوج درهم‌تنیده، تابش‌دهی کوانتومی، حالت‌های چگالیده.

Different Quantum Illumination Protocols: Concepts and Applications in Metrology and Sensing

Narges Kafaei [1] and Ata-Malek Ghorbanzadeh[1,2]*

1. Quantum-Optics Laboratory, Institute of Quantum Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Laser Research Laboratory, Department of Physics, University of Tehran, 143995596, Tehran, Iran

Abstract:

The interaction between light and nonlinear environments leads to non-classical lights that have different characteristics than conventional light. These non-classical lights have lower inherent noise than the classical light. Squeezed lights as well as entangled photon pairs have caused many new applications in quantum illumination. For example, using a squeezed state of light and injecting it into a multi-kilometers interferometer, very weak gravitational waves that induces displacements as little as 10^{-19} meters, have been detected. Entangled photon pairs have become the most important tool for emerging quantum technologies. Remote quantum communications, quantum RADAR and LIDAR, high resolution video imaging, and spectroscopy are just few examples of the various methods of quantum illumination. The advantage of quantum illumination in sensing may lead to a remote imaging of a bird that is immersed in the fog and

noise. The development of single photon detectors, especially of their array type in recent years, has vastly contributed to the emergence of these technologies. Of course, the low rate of photon pairs of current light sources (10^4-10^8), especially for the purpose of remote sensing, slows down the process of sensing. Nevertheless, the recording of very weak signals (at a rate of fraction of a photon per second) through a strong background noise has been realized. In the present paper, while reviewing the quantum technologies and their potential applications, the activities in the quantum optics laboratory of University of Tehran will also be discussed.

Keywords: Quantum technology, entangled pair, quantum illumination, squeezed light.

۱. مقدمه

در فرآیند تابش‌دهی کلاسیکی، یک هدف مورد تابش امواج الکترومغناطیسی قرار گرفته و اطلاعات مختلفی از آن در طی عبور موج و یا انعکاس از آن، با آشکارسازی دامنه و یا فاز موج به‌دست می‌آیند. با کشف لیزر و استفاده از برهم‌کنش آن با ماده، توانایی‌ها در حوزه‌ی آشکارسازی افزایش بسیاری یافته است. غالب منابع نوری شناخته‌شده، از جمله لیزرها، از حالتی از نور استفاده می‌کنند که به نور کلاسیکی و یا حالت همدوس موسوم است. برهم‌کنش نور با محیط‌های غیرخطی به دسته‌ای از نورها منجر می‌شود که خصوصیات متفاوتی از نور کلاسیکی دارند. این نورها با نوفهٔ ذاتی کمتری که نسبت به نور کلاسیکی دارند، سبب افزایش نسبت سیگنال به نوفه در برهم‌کنش با اهداف مختلف می‌شوند. در سال‌های اخیر نورهای غیرکلاسیکی به‌صورت حالت‌های چگالیده[1] و یا زوج‌های فوتونی درهم‌تنیده، به ظهور افق‌های کاربردی جدیدی در حوزه‌ی تابش‌دهی منجر شده‌اند[۱-۵]. به‌عنوان مثال رصدخانه‌ی امواج گرانشی LIGO توانسته است با استفاده از حالتی چگالیده از نور و تزریق آن در یک تداخل‌سنج چند کیلومتری مایکلسون، امواج بسیار ضعیف گرانشی ناشی از ادغام دو سیاه‌چاله را از فاصله حدود یک میلیارد سال نوری ثبت کند[۶]. اما استفاده از هم‌بستگی کوانتومی موجود در زوج‌های فوتونی درهم‌تنیده، کاربردهای بسیار متنوع‌تری را فراهم می‌سازد. هرچند که مطالعه تجربی این زوج نوری، در ابتدا برای اثبات خصوصیات مکانیک کوانتومی پیشنهاد و اثبات شد[۷] (همچنین موضوع جایزه نوبل ۲۰۲۲ را ببینید)، ولی بعدها به‌عنوان پیش‌نیاز اصلی برای فناوری‌های نوظهور کوانتومی به کار گرفته شدند. ارتباطات از راه دور و امن کوانتومی، شناسایی اهداف گم در نوفهٔ زمینه‌ای شدید با شیوه‌ای از تابش‌دهی شبیه رادار کوانتومی، تصویربرداری با تمایز بالاتر از تصویربرداری کلاسیکی آن‌هم با نرخ‌های فریم ویدیویی، طیف‌نگاری با زوج، و تصویربرداری شبح[2] تنها نمونه‌هایی از شیوه‌های مختلف تابش‌دهی کوانتومی هستند که به حساسیت‌هایی به مراتب بالاتر از مشابه کلاسیکی خود منجر شده‌اند (نزدیک به دو مرتبه بزرگی که معادل هم‌بستگی کوانتومی مرتبه دوم است).

مزیت اصلی تابش‌دهی کوانتومی در حسگری، شناسایی هدف و یا خصوصیتی از ماده در شرایط سیگنال به نوفه خیلی کم است که شیوه‌های تابش‌دهی کلاسیکی در آن مأموریت ناتوان هستند. این مزیت به لطف هم‌بستگی کوانتومی فراهم می‌شود. البته، ساخت آشکارسازهای تک فوتونی به‌خصوص از نوع آرایه‌ای آن در سال‌های اخیر، به‌عنوان یکی از سخت-افزارهای مهم در حسگری کوانتومی، آشکارسازی تک فوتونی را نیز مقدور ساخته است. با این وجود، هنوز تابش‌دهی کوانتومی نیاز به حل برخی چالش‌ها برای تجاری‌سازی دارد. محاسباتی نسبتاً ساده نشان می‌دهد که نرخ کم منابع تولید زوج‌های نوری هم‌بسته (۱۰^۴-۱۰^۹ فوتون در ثانیه)، به‌خصوص برای کاربردهای شناسایی از راه دور، نیاز به زمان‌های بالاتر انتگرال‌گیری دارد که به کندشدن فرآیند می‌انجامد. رفتن به سراغ منابع پرقدرت، منبع را از حالت تک فوتونی خارج می‌سازد و موجب هم‌بستگی‌های پیچیده‌تری می‌شود. با این وجود، در زمان‌های بزرگ انتگرال‌گیری، هم‌بستگی‌های کوانتومی سبب شده‌اند که حتی سیگنال‌های بسیار ضعیف (در حد نرخ‌های یک هزارم فوتون در ثانیه) و در حضور

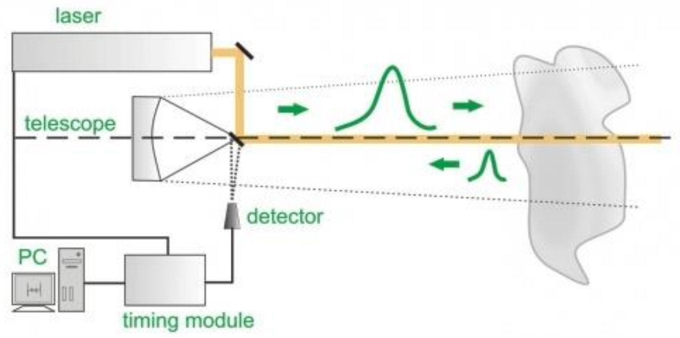
[1] Squeezed states
[2] Ghost imaging

زمینه‌ای به‌مراتب قوی از نوفه آشکارسازی شوند، که ممکن است شناسایی و تصویربرداری یک پرنده در دوردست را که در مه و نوفه گم‌شده است، امکان‌پذیر سازند. چنین قابلیتی در حوزه‌ی کوانتومی پیشرفتی قابل‌توجه محسوب می‌شود.

البته، وقتی از توانایی‌های اندازه‌گیری‌های کوانتومی صحبت می‌شود، معمولاً به محدودیت‌های آن به‌خصوص در کشور ما کمتر توجه شده است و از دستاوردهای شگرف آن به صورتی اغراق‌آمیز و غالباً به‌صورت کیفی و نه کمی صحبت به میان می‌آید. از این‌رو، ما درصدد هستیم که در این مقاله نگاهی واقع‌بینانه به افق‌های کاربردی تابش‌دهی کوانتومی داشته باشیم و چالش‌های آن را نیز موردبررسی قرار دهیم.

۱. نمونه‌هایی از سامانه‌های تابش‌دهی کلاسیکی

در اینجا تعدادی از سامانه‌های متداول کلاسیکی اشاره خواهند شد که به‌خصوص در سنجش از راه دور توانمند هستند. متداول‌ترین سامانه تابش‌دهی و آشکارسازی در فرآیند دیدن اتفاق می‌افتد که شامل نوردهی طبیعی با نور خورشید و آشکارسازی با چشم است. علی‌رغم عادت روزانه به این فرآیند، باید اشاره کرد که چشم آشکارسازی بسیار پیچیده و با حساسیت بالا است که می‌تواند نور یک شمع را از فاصله کیلومتری در شب ببیند. تصویربرداری با نرخ‌های ویدیویی توسط دوربین‌های امروزی نیز سناریوی مشابهی دارد، با این تفاوت که توان آشکارسازی بسیار بیشتری نسبت به چشم انسان داشته و حتی با تصویربرداری در طول‌موج‌های غیرمتعارف مانند فروسرخ، امکان دیدن در شب را فراهم می‌سازند. با اختراع لیزر، تابش‌دهی کلاسیکی با لیزر، در حوزه‌های کاربردی گسترده‌ای وارد شده و امروزه سبب شکل‌گیری طیف وسیعی از فناوری‌ها شده است. لیدار[1] یکی از آن سامانه‌های کلاسیکی است که به‌خصوص در شناسایی از راه دور، ابزار مهمی محسوب می‌شود[۸]. در چنین سامانه‌ای همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، پالس‌های لیزری به‌دور دست ارسال شده و انعکاس آن‌ها توسط یک سامانه تلسکوپی جمع‌آوری می‌شود. در متداول‌ترین نوع لیدار، با محاسبه زمان پرواز[2] و آگاهی از سرعت نور لیزری در محیط، فاصله جسم تا هدف تعیین می‌شود. با استفاده از همین روش فاصله ماه تا زمین به شیوه دقیقی محاسبه شده است[۹].

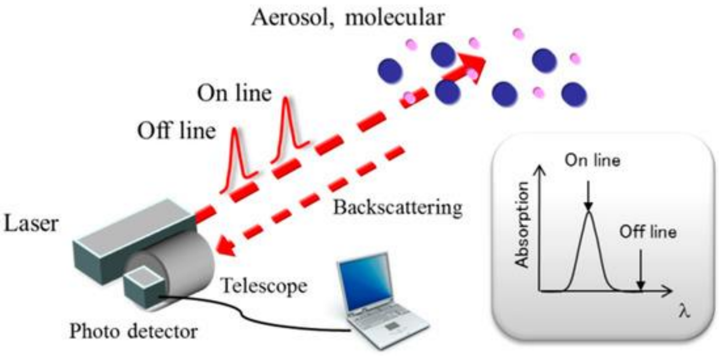


شکل ۱: آرایش شماتیک سامانه لیدار یک‌بعدی.

در نوع دیگری از لیدار که تحت عنوان لیدار تفاضلی[3] از آن یاد می‌شود، مانند آن‌چه که در شکل ۲ نشان داده شده، دو پالس متوالی به سمت جسم هدف ارسال می‌شوند، به نحوی که پالس اول در ناحیه جذب و پالس دوم که به فاصله کوتاهی بعد از پالس اول ارسال می‌گردد، مقداری دورتر از ناحیه جذب مولکول هدف قرار دارد. پس از انعکاس از عامل‌های طبیعی مانند خاک و یا ابر، سیگنال بسیار ضعیفی که برمی‌گردد حاوی اطلاعات جذب مولکولی در مسیر است که می‌تواند اوزون، مولکول هیدروکربنی و یا هر ماده دیگری باشد. تفریق شدت این دو پالس نه تنها تأیید وجود ماده، بلکه

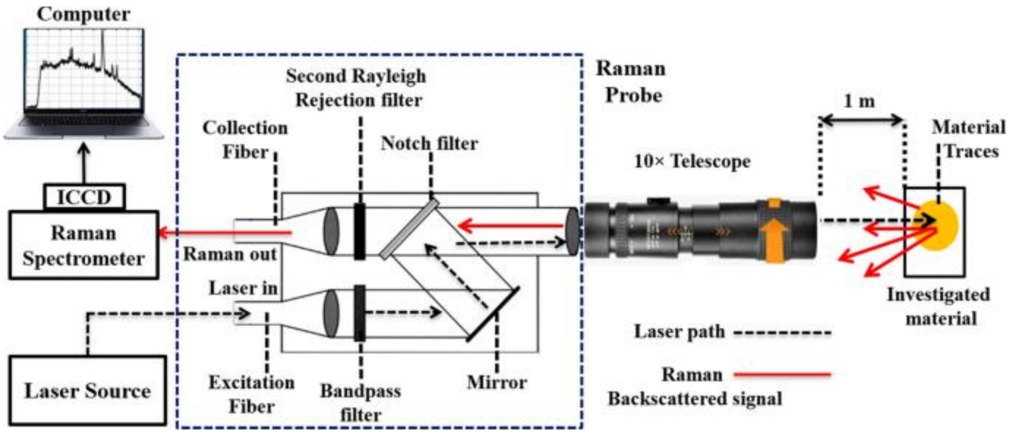
[1] Light detection and ranging (LIDAR)
[2] Time of flight (TOF)
[3] Dial LIDAR

برآوردی از تعیین غلظت آن را نیز در مسیر ممکن می‌سازد. برد چنین سامانه‌ای تا کیلومترها می‌رسد که این ویژگی سامانه کلاسیکی لیدار تفاضلی را منحصر به فرد می‌سازد.



شکل ۲: آرایش شماتیک سامانه لیدار.تفاضلی[۱۰].

سامانه رامان نمونه دیگری از سامانه کلاسیکی است که در آن مطابق شکل ۳ نوری در فرکانس مشخص به عنوان پرتو پمپ ارسال می‌شود و پس از برهم‌کنش با یک مولکول و یا جسم، فرکانس‌های جدیدی که متناظر با فرکانس‌های متفاوت و انتقال یافته استوکس یا آنتی‌استوکس هستند ، تولید و بازپراکنده می‌شوند. خصوصیات طیفی قله‌های ثبت شده به‌عنوان اثر انگشت مولکول واقع در مسیر عمل می‌کنند و شدت و مکان آن‌ها بر روی محور فرکانس، تعیین نوع ماد هدف را ممکن می‌سازد. حساسیت آشکارسازی سامانه‌های رامان تا جایی پیش رفته که قادر است مواد مخدر و یا منفجره را حتی از فاصله دور کشف کند [۱۲, ۱۱]. همان‌طور که می‌دانید همه مواد دارای بخاری در مجاورت سطح خود هستند که فشار تعادلی بسیار کمی دارند. به‌ویژه اگر این مواد پنهان باشند، فشار بسیار کمی از بخار به بیرون نشت می‌کند که حتی از یک قسمت در تریلیون هم می‌تواند کمتر باشد. آشکارسازی این حجم از مواد در فاز گازی از ابتدا موردتوجه محققین و صنعت و حتی حوزه‌های امنیتی بوده است. تا کنون چنین حساسیتی هنوز از سامانه‌های کلاسیکی گزارش نشده است، اما، سامانه‌های لیزری توانسته‌اند از راه دور این مواد را که به‌صورت ذرات میکرونی بر روی لباس و دست و بدن کاربر قرار گرفته‌اند، تعیین و هشدار دهند [۱۳]. شاید برای شناسایی بخار مواد پنهان، باید منتظر فناوری‌های حساس‌ترکوانتومی باقی ماند.



شکل ۳: آرایش شماتیک سامانه از راه دور رامان[۱۴].

در مثالی دیگر می‌توان از طیف‌نگاری هارمونیک دوم یاد کرد که قابلیت تعیین غلظت یک گاز را در برهم‌کنش با لیزر فراهم می‌سازد. این سامانه می‌تواند هم به‌صورت موضعی و هم از راه دور عمل کند و معمولاً از لیزرهای دایودی استفاده می‌کند که در آن اعمال مدولاسیون‌های مختلف به‌سادگی توسط سیگنال الکتریکی پمپ فراهم می‌شود. در این مورد، پرتو نور لیزری که دامنه و فرکانس آن تحت مدولاسیون سینوسی قرار گرفته، به دوردست ارسال می‌شود. سپس، دامنه

ضعیفی از نور در اثر عامل‌های طبیعی همچون خاک و یا تپه، منعکس و به آشکارسازی که درست در محل منبع نور لیزر ارسالی قرار گرفته، می‌رسد و آشکار می‌گردد. اگر مولکول‌های یک گاز که فرکانس نور لیزر ارسالی حول فرکانس تشدید آن است، در مسیر قرار گرفته باشند، آثار جذب به شکل ظهور هارمونیک‌های جدید در سیگنال ثبت شده نمایان خواهند شد. این سامانه قادر است انتگرال غلظت مسیر کمی را در بازه زمانی کوتاه آشکارسازی نماید. شکل ۴ یک نشت‌یاب گاز متان را بر اساس طیف‌نگاری هارمونیک دوم نشان می‌دهد که به سفارش شرکت ملی گاز ایران در دانشکده فیزیک دانشگاه تهران ساخته شده است. این سامانه قادر است انتگرال غلظت مسیر به اندازه ۵۰ppm-m را در بازه زمانی ۰٫۰۵s ثانیه، از فاصله ۳۰m اندازه‌گیری کند. معنی این انتگرال غلظت این است که اگر ابر نشت گاز طبیعی، که عمده ترکیب آن را متان تشکیل می‌دهد، کره‌ای به قطر ۱۰m باشد، آن‌گاه تعیین غلظت بیشتر و یا مساوی ۵ppm (۵ قسمت در میلیون) از راه دور توسط این سامانه امکان‌پذیر است و آن را هشدار می‌دهد. با افزایش برد این سامانه تا ۱۰۰m، حساسیت سنجش غلظت آن مقداری کاهش می‌یابد و به حدود ۱۰۰ppm-m می‌رسد. این سامانه تست‌های موفق فضای باز را پشت سر گذاشته است.

شکل ۴: سامانه کلاسیکی نشت‌یاب گاز متان ساخته‌شده در دانشکده فیزیک دانشگاه تهران[۱۵].

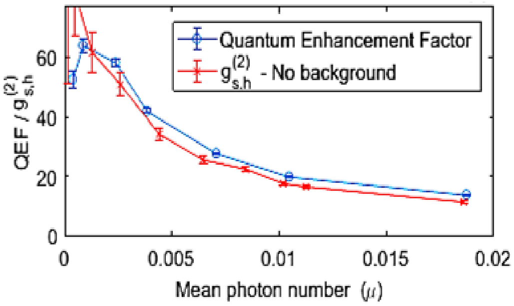
رادار، سامانه مهم کلاسیکی دیگری است که در ناحیه طول‌موجی ریزموج کار می‌کند. مولدهای قوی امواج سانتی‌متری، پرتوهای تولیدی را به دوردست ارسال می‌کنند و انعکاس نسبتاً ضعیف امواج توسط اهداف دوردست، با آنتن‌هایی که برای این ناحیه طول‌موجی طراحی شده‌اند، آشکارسازی می‌شود. بنابراین، از این طریق، وجود یک هدف در دوردست تشخیص داده می‌شود. طبیعتاً، انتظار می‌رود که چنین سیستم‌هایی دارای برد بسیار بالا در حد صدها کیلومتر باشند تا بتوانند فضای بزرگی را پوشش دهند. از این‌رو، امواج ناحیه اپتیکی به‌دلیل پراکندگی و جذب بالا در اتمسفر برای این کار مناسب نیستند و این امواج سانتی‌متری هستند که شرایط عملکرد از راه دور را فراهم می‌سازند. البته، سطح مقطع انعکاس راداری بالا نیز در تعیین طول‌موج اهمیت دارد. به نظر می‌رسد که زمان تجدید نظر در این فناوری، با توجه به فناوری‌های مختلف رادارگریزی که مدت‌هاست توسعه یافته‌اند، فرا رسیده است. سطح مقطع بسیار کم پرنده‌های رادار گریز امروزی، باعث انعکاس بسیار ضعیف امواج می‌شوند که شناسایی آن‌ها را دشوار ساخته است. بنابراین، ظهور رادارهای کوانتومی که قادر هستند سیگنال‌های بسیار ضعیف را آشکارسازی کنند، پراهمیت تلقی می‌شود.

۲. تابش‌دهی کوانتومی

سامانه‌های کلاسیکی علی‌رغم موفقیت‌های قابل‌توجهی که در حوزه‌ی سنجش به‌خصوص بر مبنای طیف‌نگاری داشته‌اند، حساسیت‌های آشکارسازی محدودی دارند. به‌عنوان مثال آشکارسازهای متداول در این شیوه‌ها به زحمت قادر هستند که نور ضعیف ستارگان دور دست را که شدت آن‌ها به کسر کوچکی از یک فوتون در ثانیه می‌رسد، آشکارسازی کنند. علاوه بر این، شناسایی غلظت‌های مولکولی در ابعاد یک‌هزارم قسمت در تریلیون (فمتو پارت) شاید تنها توسط سامانه‌های حجیم و غیرقابل‌حمل طیف‌نگاری جرمی امکان‌پذیر باشد. ظهور فناوری‌های کوانتومی و اثبات فناوری برخی از شیوه‌های سنجش کوانتومی، اما، نوید شناسایی‌های حساس حتی در سطح یک تک مولکول و یا اتم را با دستگاه‌های قابل‌حمل فراهم می‌سازد.

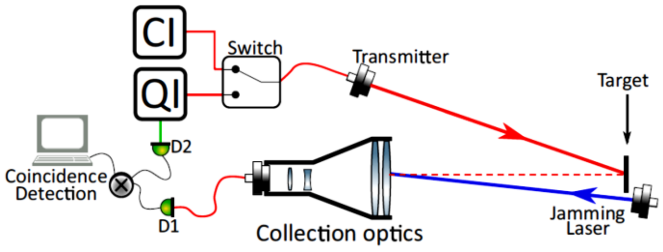
کاربردهای بسیاری قابل‌تصور هستند که نیاز به آشکارسازی با سطحی از سیگنال‌های بسیار ضعیف دارند که برای تحقق آن‌ها، آشکارسازی و یا تصویربرداری‌های متداول و شناخته شده کلاسیکی ناتوان هستند. به‌عنوان مثال، یک هدف پنهان شده در مه و مانع در دور دست، تصویر یک شناور زیرسطحی در محیطی به‌شدت جاذب مثل دریا، شناسایی غلظت‌های بسیار کم مولکول‌های هیدروکربنی برای اکتشاف میدان‌های نفتی و گازی، یک پهپاد در دوردست و مبهم با نور ارسالی بسیار ضعیف، یک ماد شیمیایی پنهان با سطح بخار تعادلی بسیار کم، و شناسایی صحنه‌های متنوع دیگری که سطح سیگنال‌های ارسالی از آن‌ها بسیار کم است، بدون به‌کارگیری سنجش‌های حساس کوانتومی، ممکن است هرگز کشف نشوند. مزیت کوانتومی سبب می‌شود که حساسیت آشکارسازی از صحنه‌ها، تا نزدیک به دو مرتبه بزرگی افزایش پیدا کند.

در سال ۲۰۰۸ لوید با استفاده از رهیافت ماتریس چگالی نشان داد که تابش‌دهی کوانتومی مزیت بسیار بیشتری نسبت به شیوه‌های متداول کلاسیکی، در آشکارسازی یک هدف غرق در نوفهٔ قوی محیطی، دارد[۱۶]. در این صورت، اگر از تمام مزیت‌های حالت کوانتومی مانند حالت درهم‌تنیده فوتونی استفاده شود، سنجش در محیط‌هایی با نوفهٔ بسیار بالا یا شناسایی اهدافی که در نوفهٔ زمینه بسیار بالا قرار گرفته‌اند و شناسایی آن‌ها توسط شیوه‌های کلاسیکی ممکن نیست، با روش‌های کوانتومی با ضریب اطمینان بالا امکان‌پذیر خواهد بود. در نظریه مطرح شده، نورهای آشکارسازی شده فقط با احتمالی می‌توانند، به هدف کم در نوفه نسبت داده شوند و غالباً سیگنال‌های آشکارسازی شده به نوفهٔ قوی محیطی تعلق دارند. می‌توان نشان داد که در چنین شرایطی، شانس آشکارسازی هدف، اگر از زوج‌های درهم‌تنیده استفاده شود، نسبت به استفاده از شیو کلاسیکی تابش‌دهی تک پرتو، افزایش بسیاری پیدا می‌کند. نتایج تجربی ارائه شده در شکل ۵ امکان مقایسه این دو شیوه را به‌خوبی فراهم می‌سازد[۱۷].



شکل ۵: نمودار نسبت سیگنال به نوفهٔ کوانتومی به سیگنال به نوفهٔ کلاسیکی (مزیت کوانتومی)، در شدت‌های بسیار کم از سیگنال دریافتی [۱۷].

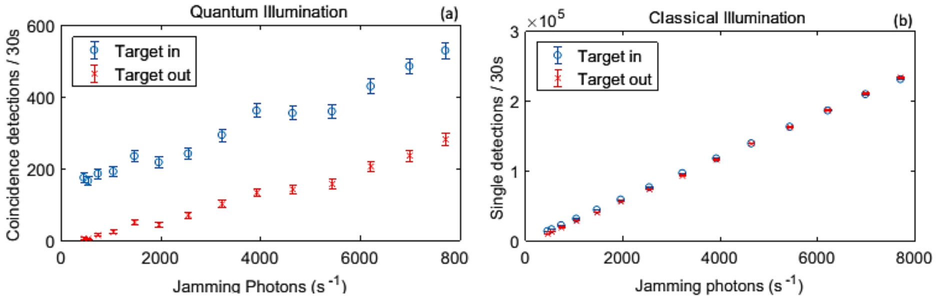
همان‌طور که دیده می‌شود، مزیت سامانه کوانتومی نسبت به کلاسیکی به‌خصوص در شدت‌های سیگنال بسیار کم کاملاً متمایز می‌شود. در این آزمایش، زوج فوتون‌های درهم‌تنیده توسط یک محیط غیرخطی (فیبر نوری) تولید می‌شوند و شاخه سیگنال آن به دور دست ارسال و موج برگشتی از این شاخه توسط آشکارساز D1 ، ثبت می‌گردد. اما، شاخه دوم زوج (آیدلر)، بدون برهم‌کنش توسط D2 آشکارسازی می‌شود. یک سامانه پردازشی، شمارش همزمان این دو فوتو دایود را (پس از جبران زمان تأخیری)، که تقریباً همان تابع همدوسی مرتبه دوم $g^2(0)$ نیز است ، اندازه‌گیری می‌کند (شکل ۶).



شکل ۶: تصویری شماتیک از آرایش تجربی به کار رفته در تابش‌دهی کوانتومی[۱۷].

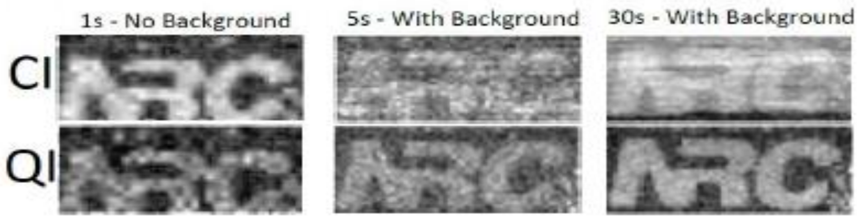
زوج فوتون‌ها در چند پارامتر از جمله در زمان هم‌بسته هستند. بنابراین، وجود فوتون‌های هم‌زمان در دو آشکارساز، حاکی از انعکاس فوتون درست (و نه فوتون نوفه و یا زمینه) از هدف است. بنابراین، شمارش هم‌زمان سبب می‌شود تا تعداد زیادی از شمارش‌های زمینه که در اندازه‌گیری کلاسیکی معمولاً در نظر گرفته می‌شوند، حذف و نوفه به مقدار زیادی کاهش یابد. در صورتی‌که، تنها شمارش D1 منظور شود و از اطلاعات D2 استفاده نشود، همان تابش‌دهی متداول کلاسیکی به‌دست می‌آید.

درشکل ۷ نیز، نتایج دو آزمایش که در آن‌ها اندازه‌گیری‌های کوانتومی و کلاسیکی با هم مقایسه شده‌اند، نشان داده شده است. در این آزمایش، وجود یک هدف در مسیر و در حضور نوفهٔ شدید،توسط دو شیوه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.



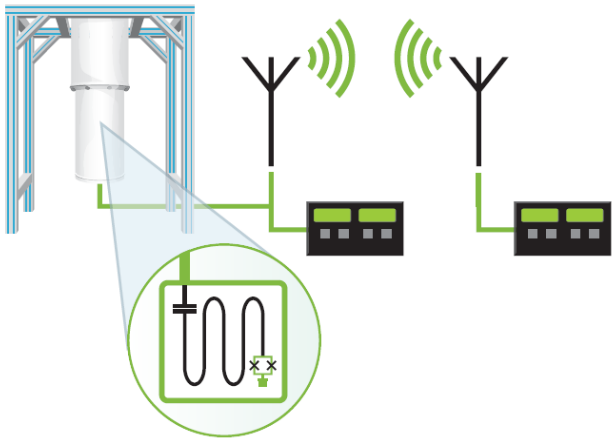
شکل ۷: مقایسه تابش‌دهی کوانتومی و کلاسیکی برای اثبات وجود یک هدف[۱۷].

نوفه به‌صورت مصنوعی توسط یک لیزر که نور همدوس (کلاسیک) به سمت آشکارساز D1 ارسال می‌کند (jamming photons)، تولید می‌شود. نور همدوس دارای آمار پواسن است که طبیعتی تصادفی دارد و می‌تواند نماینده‌ای برای نوفه تلقی شود. نور سیگنال انعکاس‌یافته از هدف در سطح بسیار پایین در حدود ۰/۰۰۶ فوتون می‌باشد که نسبت به نوفه که در حد چند هزار فوتون بر ثانیه است (jamming)، بسیار ناچیز است. همان‌طور که دیده می‌شود، شیو تابش‌دهی کوانتومی برتری قابل‌توجهی نسبت به تابش‌دهی کلاسیکی دارد، به‌نحوی‌که شیو کلاسیکی قادر نیست که حضور و یا عدم حضور یک هدف را در حضور نوفهٔ شدید تشخیص دهد. اما، شیو کوانتومی تقریباً مستقل از نوفهٔ زمینه، به‌خوبی دو حالت متفاوت را متمایز می‌سازد. این به لطف کاهش بیشتر نوفه در تابش‌دهی کوانتومی که به افزایش سیگنال به نوفه منجر می‌شود، امکان‌پذیر می‌شود. با جاروب کردن پرتو سیگنال، و تعداد زیادی اندازه‌گیری، می‌توان تصویربرداری نیز انجام داد. نتایج تصویربرداری کلاسیکی و کوانتومی از یک لوگو در شکل ۸ نشان داده شده است. در حضور نوفه، مزیت کوانتومی در وضوح تصویر نسبت به شیو کلاسیکی، واضح است[۱۷].

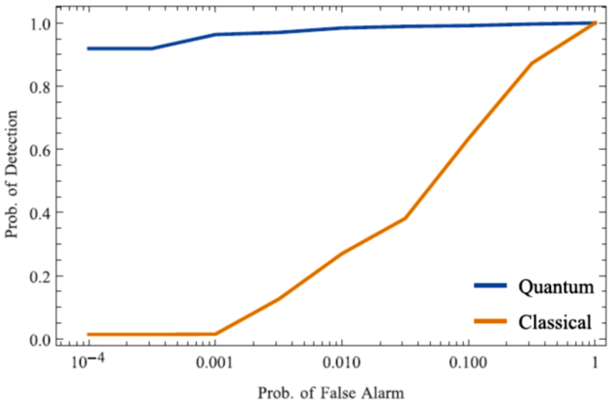


شکل ۸ :نتایج تصویربرداری کلاسیکی و کوانتومی از بازسازی تصویر یک لوگو [۱۷].

در واقع، در این آزمایش کلیدی تنها از هم‌بستگی زمانی فوتون‌های زوج، و یا استفاده از شمارش هم‌زمان با پنجره زمانی با ابعاد پیکوثانیه، استفاده شده است. اگر از سایر پارامترهای هم‌بستگی، همچون تکانه و یا قطبش نیز استفاده شود، نتایج باز هم بهتر خواهند شد. آزمایش شرح داده شده در بالا، در واقع اساس فرآیند رادار کوانتومی را نیز نشان می‌دهد، با این تفاوت که این کار در ناحیه طول‌موجی فروسرخ صورت گرفته است. اما، رادار قاعدتاً باید در ناحیه ریزموج عمل کند که جذب و پراکندگی اتمسفر در این ناحیه خیلی کمتر است. رادار کوانتومی در ناحیه ریزموج نیز عملی شده است که از منبع اتصال جوزفسون در مواد ابرسانایی به‌عنوان منبع تولید زوج استفاده می‌کند، شکل شماتیک ۹ را ببینید[۱۸]. نتایج این پژوهش در شکل ۱۰ خلاصه شده است که مزیت رادار کوانتومی را به‌خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۹: نمایشی از رادار کوانتومی توسط ریزموج‌های تولید شده از اتصال جوزفسون. یکی از پرتوهای درهم‌تنیده ریزموج برای برهم‌کنش با هدف به دوردست ارسال می‌شود، ولی پرتو دوم برای آشکارسازی هم‌بسته با موج انعکاس‌یافته از هدف در دسترس باقی می‌ماند[۱۸].



شکل ۱۰: مزیت رادار کوانتومی نسبت به رادار کلاسیکی. همان‌طور که دیده می‌شود، رادار کلاسیکی تنها در هشدارهای اشتباه فراوان ممکن است هشدار درستی هم اعلام کند. اما، هشدارهای رادار کوانتومی تقریباً از قطعیت کامل تحت شرایط مختلف (از جمله شدت‌های کم) برخوردار است [۱۸].

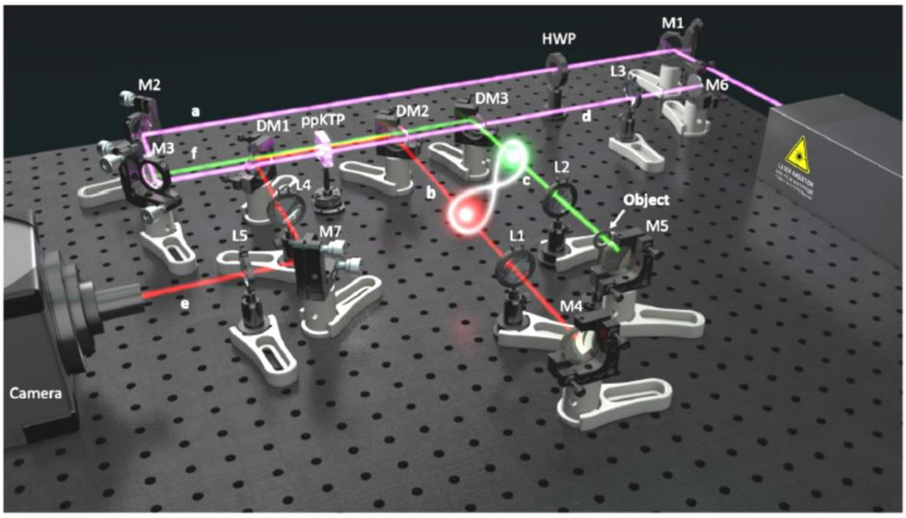
البته، تاکنون این نمایش در فاصله‌های کم آزمایشگاهی تحقق یافته است. برای افزایش برد باید منتظر نتایج بعدی ماند. برزنجه و همکاران نیز در کار مشابهی از پیوندگاه جوزفسون و القای پارامتریک برای ایجاد هم‌بستگی بین زوج پرتو تولیدی استفاده نموده‌اند[۱۹].

از شیوه‌های تابش‌دهی کوانتومی می‌توان برای بهبود نشت‌یاب‌های از راه دور لیزری کمک گرفت که ممکن است تعیین غلظت‌های ppb و یا کمتر از نشت را از فاصله‌های چند صد متری تحقق بخشند. آشکارسازی چنین غلظت‌هایی توسط سامانه متداول لیزری و کلاسیکی، قابل‌تصور نیست. در این رابطه، تیم ما شمایی از تابش‌دهی اصلاح یافته کوانتومی را پیشنهاد داده است که در آن مزیت کوانتومی تقریبا برابر با مقدار هم‌بستگی مرتبه دوم کوانتومی زوج‌های درهم‌تنیده، در فرآیند اندازه‌گیری غلظت مولکولی حاصل می‌شود[۲۰]. ما درصدد هستیم تا این شیو پیشنهادی را در صورت تأمین بودجه، به‌صورت تجربی نمایش دهیم.

علاوه بر این، تصویربرداری کوانتومی می‌تواند قدرت تفکیک بسیار بالاتری ارائه دهد که این ویژگی در کاربردهای میکروسکوپی اثبات فناوری شده است. طرح‌های شماتیکی از آرایش‌های تجربی برای دو سناریوی تصویربرداری در شکل‌های ۱۱ و۱۲ نمایش داده شده‌اند. در سناریوی نور آشکار نشده[1]، پرتوهای پمپ لیزر از دو طرف به کریستال غیرخطی می‌تابند. درنتیجه دو جفت نور سیگنال و آیدلر از دو طرف کریستال خارج می‌شوند. نور آیدلر در طرف راست

[1] Undetected light

بعد از برهم‌کنش با هدفی دوردست و انعکاس و یا عبور از آن، با تغییراتی مجدد به آرایش تجربی، برای معرفی به کریستال، تزریق می‌گردد. این پرتو بدون هیچ‌گونه اندازه‌گیری از سمت دیگر کریستال خارج خواهد شد. پرتو سیگنال در سمت راست پس از انعکاس از آینه مجدداً به کریستال تزریق و از سمت چپ خارج می‌شود و با پرتوسیگنالی که با پمپ چپ‌رونده تولید شده، ترکیب و به دوربین آرایه‌ای برای آشکارسازی معرفی می‌گردد. به‌دلیل عدم قابلیت تشخیص فوتون‌های این دو پرتو، در محل آشکارساز، طرح تداخلی، که اطلاعات هدف در آن منعکس شده، تشکیل می‌شود. در این طرح طول‌موج آیدلر در ناحیه فروسرخ است در حالی‌که، سیگنال در ناحیه مرئی تولید شده که آشکارسازی آن در این ناحیه دارای بلوغ کامل است و نسبت سیگنال به نوفهٔ بهتری را نسبت به ناحیه فروسرخ ارائه می‌دهد. سیگنال‌های خروجی از آشکارساز آرایه‌ای، پس از تقویت لازم، توسط پردازشگر و با استفاده از نرم‌افزارهای پردازش تصویر، تصویر هدف را ساخته و بر روی یک نمایشگر نشان می‌دهد. این‌که پرتو آیدلری که با هدف برهم‌کنش می‌کند، در ناحیه طیفی به دور از ناحیه فرکانسی پرتو سیگنالی قرار دارد که آشکارسازی می‌شود، امکانی است که تنها توسط شیو کوانتومی فراهم می‌شود و شیوه‌های کلاسیکی از چنین قابلیتی برخوردار نیستند. تصور کنید که مولکول هدف در ناحیه مثلاً ۱٫۶۵ میکرون جذب دارد (مثل مولکول متان)، در این‌صورت پرتو آیدلر باید برای چنین فرکانسی تنظیم شود. اگر پرتو پمپ حدود ۴۰۰nm باشد، قانون بقای انرژی دیکته می‌کند که پرتو سیگنال در ناحیه مرئی قرار گیرد که البته توسط یک دوربین آرایه‌ای آشکارسازی می‌گردد. با توجه به این‌که آشکارسازهای ناحیه فروسرخ دارای نوفهٔ بسیار بالاتری نسبت به آشکارسازهای ناحیه مرئی هستند، این‌که برهم‌کنش در ناحیه فروسرخ (جایی که مولکول جذب دارد و شناسایی آن مدنظر است) و آشکارسازی در ناحیه مرئی صورت می‌گیرد که همان اثرات انگشت جذب مولکولی در ناحیه فروسرخ را از طریق هم‌بستگی کوانتومی آشکار می‌کنند، امکانی بی‌نظیر برای افزایش سیگنال به نوفه را فراهم می‌سازد که در شیوه‌های کلاسیکی سابقه نداشته است. این آرایش تجربی را می‌توان برای طیف‌نگاری نیز به کار برد. برای تصویربرداری از اجسام دوردست نیز می‌توان از این شیوه استفاده کرد. در این حالت بهتر است که آیدلر در ناحیه پنجره اتمسفر (مثلاً در طول‌موج مخابراتی ۱۵۵۰nm) تنظیم گردد. در چنین حالتی، سیگنال که هرگز به جایی ارسال نشده و برهم‌کنشی با جسم دوردست نداشته است، مستقیماً توسط یک آرایه در ناحیه مرئی آشکارسازی می‌شود. آیدلر پس از انعکاس یا عبور از جسم به سامانه برگشته و بر روی کریستال غیرخطی متمرکز می‌شود. در واقع تصویر از طریق آیدلر و در درون کریستال به پرتو سیگنال ترجمه و منتقل می‌شود.

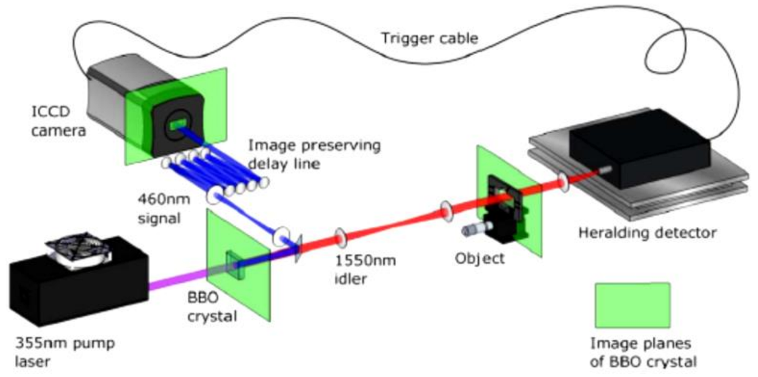


شکل ۱۱: شماتیکی از آرایش تجربی تصویربرداری با فوتون‌های آشکار نشده [۲۱].

تصویربرداری شبح دارای ساختار ساده‌تری است، و همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، یک کریستال غیرخطی مانند[۱] BBO، تحت تابش پرتو پمپی با طول‌موج ۳۵۵nm قرار می‌گیرد و زوج فوتون‌های درهم‌تنیده و غیرتبهگن در

[11] Beta barium borate

طول‌موج‌های ۱۵۵۰nm (آیدلر) و ۴۶۰nm (سیگنال) تولید می‌شوند. آیدلر هدف را مورد تابش قرار می‌دهد که هم در مد انعکاسی و هم عبوری توسط یک آشکارساز تک پیکسل تک فوتونیInGaAs آشکارسازی می‌گردد. پرتو سیگنال بدون برهم‌کنش با هدف مستقیماً به آشکارساز آرایه‌ای سیلیکونی فرستاده می‌شود. سیگنال‌های خروجی از دو آشکارساز پس از تجمیع در پردازشگر، و پردازش تصویر، بر روی یک نمایشگر نشان داده خواهند شد. در چنین آرایشی نیز امکان برهم‌کنش غیرتبهگن فراهم می‌شود که در آن طول‌موج‌های پرتوهای آیدلر و سیگنال می‌توانند خیلی از هم فاصله داشته باشند. به‌دلیل سیگنال به نوفه بسیار بالاتر در شیوه‌های کوانتومی، قدرت تفکیک تصاویر گرفته شده بیشتر از تصویربرداری متداول کلاسیکی خواهد بود.



شکل ۱۲: شماتیکی از آرایش تجربی تصویربرداری شبح[۲۲].

در اینجا تنها مثال‌هایی از شیوه‌های کوانتومی در سنجش ارائه شدند که در آن‌ها مزیت کوانتومی سبب می‌شود حساسیت سنجش نسبت به شیوه‌های کلاسیکی افزایش بسیاری پیدا کند.

با ورود محصولات فناوری‌های کوانتومی به حوزه‌ی صنایع و دفاعی، انتظار می‌رود که سطح توانایی‌های اکتشاف و آشکارسازی در طی یک تا دو دهه آینده به‌صورت بی‌سابقه‌ای افزایش پیدا کند. نکته قابل‌توجه در شیوه‌های شناسایی کوانتومی مبتنی بر زوج این است که، به‌دلیل ارسال یکی از سیگنال‌ها به دوردست برای برهم‌کنش با هدف، که خود در مقایسه با کاربردهای کلاسیکی، نور بسیار ضعیفی محسوب می‌شود، شناسایی مکان سامانه کوانتومی (تصویربردار، رادار، لیدار و غیره)، توسط دیگران ممکن نیست. بنابراین، این شیوه فرآیند امنی را رقم خواهد زد. در واقع، اگر طرف ناشناسی بخواهد موقعیت آشکارساز را کشف کند، فقط می‌تواند از تک پرتویی که در دسترس دارد استفاده نماید در این‌صورت، تنها استفاده از شیوه‌های کلاسیکی برای اندازه‌گیری توسط این شخص فراهم خواهد بود. سطح بسیار ضعیف شدت سیگنال ارسالی توسط سامانه به دوردست (حدود $۱۰^{۲}$-$۱۰^{۶}$ فوتون در ثانیه)، که از سطح نوفه محیط معمولاً کمتر است، سبب می‌شود تا شیوه‌های آشکارسازی کلاسیکی به سختی بتوانند مکان آشکارساز را شناسایی کنند. اما، شیوه‌های کوانتومی به‌دلیل در دسترس بودن زوجی از فوتون‌های هم‌بسته، حتی در سیگنال‌های ضعیفی به اندازه کسری از فوتون در ثانیه، قادر به اندازه‌گیری هستند.

در پایان این بخش باید به محدودیت‌های واقعی شیوه‌های کوانتومی نیز اشاره نمود. یکی از چالش‌های اصلی برای ورود فناوری‌های کوانتومی به‌خصوص برای کاربردهای از راه دور، تعداد کم فوتون‌های هم‌بسته تولیدی توسط شیوه‌های شناخته شده است[۱۸]. در بردهای بالای رادار کوانتومی و یا تصویربرداری از اهداف دور، نیاز به تولید زوج‌های درهم‌تنیده با نرخی بیش از $۱۰^{۱۰}$ فوتون بر ثانیه است که این نرخ‌ها به سختی قابل حصول هستند. با یک محاسبه ساده، با توجه به افت شدت نور به‌صورتR^{-2} و ضریب انعکاس کم اجسام (در حد درصد و دهم درصد)، و با فرض ارسال پرتویی با زاویه واگرایی کم و صرف‌نظر از جذب و پراکندگی اتمسفر، با در نظر گرفتن مساحت مؤثر سامانه تلسکوپی جمع‌آوری پرتو معادل حدود $۰,۱m^2$، و همچنین با فرض ارسال پرتویی با نرخ $۱۰^{۶}$ فوتون بر ثانیه (که نرخ متداول منابع موجود است)،

نرخ دریافت فوتون‌های دریافتی از فاصله ۲km معادل ۰,۰۰۰۱ فوتون بر ثانیه به‌دست می‌آید که بسیار کم است و برای تشخیص، به زمان‌های انتگرال‌گیری بالایی (صدها ثانیه) نیاز دارد. این عدد از نوفهٔ ذاتی آشکارسازهای تک فوتونی نیز کمتر است. حتی با وجود آشکارسازی، اگر هدف متحرک باشد، تعقیب آن با چنین منبعی امکان‌پذیر نخواهد بود. این مثال به‌خوبی نشان می‌دهد که چرا باید به سراغ منابع پرقدرت‌تر نورهای غیرکلاسیکی رفت. به همین دلیل، در مثال تصویربرداری از فاصله‌های دور، تصویربرداری شبح کلاسیکی، به‌دلیل در دسترس بودن منابع پرقدرت نورهای کلاسیکی، به تصویربرداری شبح کوانتومی مزیت دارد. ولی در تصویربرداری موضعی، مانند تشکیل تصاویر از میکروسکوپ، تصویربرداری کوانتومی وضوح بیشتری را فراهم می‌سازد [۲۳, ۲۲]. چالش بعدی به فاصله‌یابی برمی‌گردد که با زمان تأخیری بین دو پرتو سیگنال و آیدلر ارتباط دارد. آشکارسازی هم‌زمان، نیاز به جبران تأخیر زمانی دارد، که خود ناشناخته است. خوشبختانه، اگر سیگنال به نوفه به اندازه کافی بزرگ باشد، می‌توان با امتحان کردن پنجره‌های زمانی مختلف، سیگنال و فاصله را هم‌زمان پیدا کرد. اگرچه، تعقیب دینامیک یک هدف، نیازمند زمان‌های پردازش بسیار بالا خواهد بود.

از حالت‌های چگالیده نوری در رصدخانه امواج گرانشی LIGO استفاده شده است که امکان شناسایی ادغام دو سیاه‌چاله را در فاصله ۱,۳ بیلیون سال نوری از زمین فراهم ساخته و به جایزه نوبل در سال ۲۰۱۷ منجر شده است[۶] (شکل ۱۳). در این رصدخانه از یک تداخل‌سنج مایکلسون با طول بازوهای ۴km در زیر زمین استفاده شده است. اگر این تداخل‌سنج توسط نور چگالیده پر شود، حساسیت اندازه‌گیری جابه‌جایی آینه‌ها توسط امواج، نسبت به حالتی که در آن از نور همدوس استفاده شود، افزایش بسیاری پیدا می‌کند، به‌طوری‌که اندازه‌گیری جابه‌جایی‌هایی در حد m 10^{-19} امکان‌پذیر می‌شود که کوچک‌ترین جابه‌جایی ثبت شده تا کنون است. نور همدوس، دارای افت و خیز ذاتی است که نسبت آن به تعداد متوسط فوتون‌های موجود در یک بسته موج، n، معادل مقدار $n^{-1/2}$ است. در نور چگالیده این نسبت معادل n^{-1} می‌باشد، که افت و خیز کمتری را نشان می‌دهد. در حالت متداول، تداخل‌سنج در حالت تداخل ویرانگر تنظیم می‌گردد، به‌نحوی‌که در آشکارساز شدت تقریباً صفر مشاهده شود (با وجود افت وخیز هرگز صفر نمی‌شود). حال اگر یک موج گرانشی به تداخل‌سنج بتابد، طول یکی از بازوها، ممکن است نسبت به دیگری بیشتر جابجا شود که با فرکانس مشخصی (فرکانسی که به اولین کشف موج گرانشی منجر شد حدود ۲۰۰Hz بود[۶]) به‌صورت متناوب تکرار می‌شود. بنابراین، شدت نور در آشکارساز به‌صورت متناوب کم و زیاد می‌شود، که در صورت وقوع نسبت سیگنال به نوفه بالاتر از یک، قابلیت شناسایی دارد. این اتفاق تنها با نور چگالیده امکان‌پذیر شده که افت و خیز کمتری دارد. البته، منابع متعدد دیگری از نوفه نیز وجود داشته‌اند، که ما در اینجا قصد ورود به جزئیات آن‌ها در این آزمایش را نداریم.

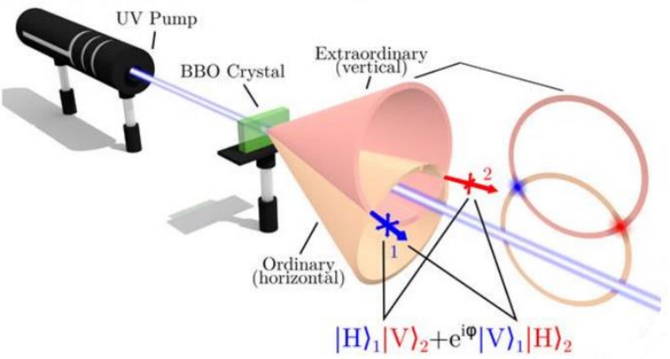
شکل ۱۳: نمایی از تداخل‌سنج ۴km، رصدخانه امواج گرانشی LIGO، در شهر لوینگستون آمریکا[۶].

روی‌هم‌رفته، با مثال‌های مطرح شده می‌توان گفت که فناوری‌های کوانتومی مرز دقت در سنجش را بسیار فراتر از شیوه‌های کلاسیکی جابه‌جا می‌کنند و اگر برخی از چالش‌ها حل شوند، باید منتظر ورود این فناوری‌ها در زندگی روزمره در یک و یا دو دهه آینده بود.

۳. منابع نورهای کوانتومی

مهم‌ترین منبعی که در تابش‌دهی کوانتومی مورد استفاده قرار می‌گیرد و در واقع پیش‌نیاز ساخت یک حسگر کوانتومی است، زوج‌های درهم‌تنیده فوتونی هستند[۲۵, ۲۴]. تا کنون، متداول‌ترین شیوه تولید چنین زوج فوتونی، فرآیند تبدیل پارامتری خودبه‌خودی رو به پایین (SPDC)[۱] در کریستال‌های غیرخطی بوده است[۲۶-۲۹]. اما، اقدامات بسیار گسترده‌ای برای تولید این زوجها توسط نیمه‌هادی‌ها در ساختارهای نقاط کوانتومی[۲] و حل چالش‌های آن نیز در حال انجام است. البته، تولید حالت‌های درهم‌تنیده با شیوه‌های دیگری مانند استفاده از بخار اتمی همچون روبیدیم نیز تجربه شده است[۳۰]. با این وجود، تا کنون، دو فرآیند بسیار مهم SPDC و نقاط کوانتومی، بیشتر موردتوجه قرار گرفته‌اند.

در فرآیند SPDC همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده ، نور پمپی معمولاً در ناحیه فرابنفش به کریستال تابیده می‌شود و زوجی از فوتون‌ها با فرکانس کمتر معمولاً در ناحیه فروسرخ تولید می‌شوند. چنان‌چه زوج فوتون تولید شده دارای فرکانس یکسانی باشند، فرآیند حاصل تبهگن است، در غیر این صورت یک فرآیند تبدیل فرکانسی غیرتبهگن صورت پذیرفته که در آن دو پرتو حتی می‌توانند در طول‌موج‌های بسیار دوری از هم تولید شوند، به‌نحوی‌که بقای انرژی و بقای تکانه به‌طور همزمان برقرار باشند.



شکل ۱۴: نمایش شماتیک فرآیند تبدیل پارامتری خودبه‌خودی رو به پایین در کریستال غیرخطیBBO[۳۱].

این دو شرط محدودیتی جدی بر روی طول‌موج‌های تولید شده و کریستال‌هایی که پتانسیل استفاده در این حوزه را دارند، ایجاد می‌کند. هرچند که با استفاده از روش‌هایی همچون متناوب ساختن جهت قرارگیری محور برگزیده کریستال، می‌توان شرط قانون بقای اندازه حرکت را در کریستالی شبیه PPLN[۳] ساده‌تر کرد. با استفاده از فرآیند SPDC در مشدد نوری، به شرطی که زیر آستانه تشدید قرار گیرد، می‌توان هم نرخ فوتون‌های تولیدی را افزایش داد و هم به پهنای طیفی بسیار باریک‌تری برای کاربردهایی مانند طیف‌سنجی و شناسایی مولکولی دست یافت[۳۳, ۳۲]. نرخ تولید زوج‌های فوتونی در فرآیندهای متداول SPDC به مقدار نوعی $۱۰^۴$ زوج بر ثانیه می‌رسد اما، پهنای طیفی آن‌ها بسیار بزرگ و در محدوده ۱nm (حدود ۱۰۰GHz) قرار دارد. استفاده از مشدد نوری موجب ارتقای نرخ تولیدی به بالای $۱۰^۶$ زوج بر ثانیه و پهنای طیفی حدود مگاهرتز می‌شود[۳۳].

برای برهم‌کنش بهتر نورهای پمپ با نورهای تولیدی در یک کریستال، می‌توان به‌جای مشددهای متداول نوری از مشددهای نوری با ضریب کیفیت (Q) بسیار بالا استفاده نمود. نمونه‌ای از این مشددها شامل یک میکروحلقه به شعاع ۳۰ میکرون از نیمه‌هادی AlGaAs است که بر روی بستر اکسید سیلیکون، ساخته می‌شود[۳۲]. در این‌صورت مشدد نوری با توانایی بالایی از حفظ پرتوها ($Q = 1.2\times 10^6$) شکل می‌گیرد. نیمه‌هادی‌های AlGaAs دارای ضرایب غیرخطی بالایی هستند. در آزمایش ذکر شده در بالا، از جمله ضریب غیرخطی مرتبه سوم در برهم‌کنش ترکیب چهار موج[۴] استفاده شده است. در این کار، درخشان‌ترین منبع هم‌بسته فوتونی در ناحیه مورد علاقه مخابرات (نزدیک ۱۵۵۰nm) با

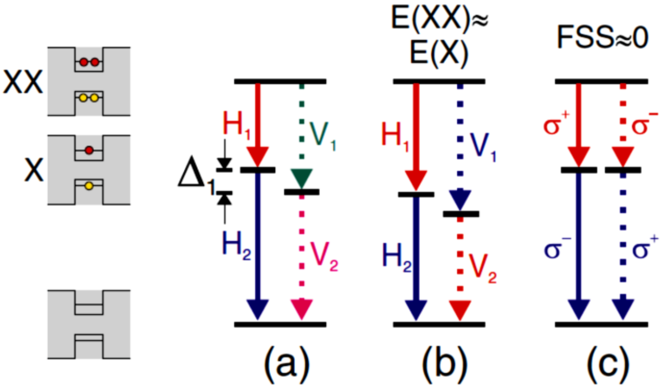
[1] Spontaneous parametric down conversion
[2] Quantum dot
[3] Periodically poled lithium niobate
[4] Four wave mixing

نرخ (^{10}pairs/(s-mW^2 و با خلوص $g^2(0) \simeq 0.004$ (برای مفهوم این پارامتر به ادامه بحث در پایین توجه کنید) تولید شده است.

مشکل اصلی در افزایش مقیاس تولید زوج با فرآیند کریستال غیرخطی، تولید حالت‌های چند فوتونی است که نرخ تولید آن‌ها با افزایش توان لیزر پمپ افزایش بسیاری می‌یابد. حتی در شدت‌های کم نیز به دلیل تابع توزیع پواسونی نور همدوس پمپ، که احتمال وقوع حالت‌های چند فوتونی در آن همچنان مخالف صفر است، تعداد حالت‌های چند فوتونی در زوج‌های تولید شده نیز قابل‌توجه است. به همین دلیل منابع SPDC، منابع تک فوتون خوبی محسوب نمی‌شوند. البته، می‌توان با ثبت یک فوتون در بازوی سیگنال، از تولید تک فوتون در بازوی آیدلر نیز مطمئن شد و به این وسیله با اندازه‌گیری، حالت آیدلر را به تک فوتون تقلیل داد. اتفاقاً، از این شیوه برای تولید حالت‌های تک فوتون با استفاده از SPDC نیز استفاده می‌کنند، به‌طوری‌که نرخ تولید تک فوتون قابل‌توجهی در حد ۲MHz تجربه شده است [۳۴]. معیار تشخیص حالت‌های تک فوتونی از نتیجه آزمایش معروف Hunbury Brown &Twiss به‌دست می‌آید که در آن پرتو توسط یک شکافنده نوری، دو قسمت شده و توسط دو آشکارساز شمارش هم‌زمان انجام می‌شود. منبعی به‌صورت ایده‌ال تک فوتونی محسوب می‌گردد که حاصل شمارش هم‌زمان آن (که تقریباً معادل همدوسی مرتبه دوم با تأخیر زمانی صفر، $g^2(0)$ است) صفر باشد. در آزمایش مطرح شده در مرجع[۳۴]، $g^2(0) \simeq 0.02$ به‌دست آمده، که هرچند کوچک، اما حاکی از وجود ناخالصی چند فوتونی است. فرآیند تولید حالت‌های فوتونی در کریستال‌های غیرخطی با پمپ همدوس، از طبیعت آماری پواسون تبعیت می‌کند به این مفهوم که، غالباً هیچ فوتونی وجود ندارد (در شاخه سیگنال، فوتونی ثبت نمی‌شود) و یا با وجود آشکارسازی، حالت‌ها ممکن است چند فوتونی باشند و گاهی حالت‌های واقعاً تک فوتونی ثبت می‌شوند. بنابراین، حالت‌های تک فوتونی بر اساس تقاضا[1] تولید نمی‌شوند. اگرچه، برای کاربردهای متنوع تابش‌دهی کوانتومی همچون لیدار، رادار، و تصویربرداری، این آمار و توزیع زمانی فوتون‌ها محدودکننده نیستند و اهمیتی ندارند، اما در حوزه‌ی ارتباطات کوانتومی داشتن یک منبع تک فوتون آن‌هم زمانی که موردتقاضا است، مهم می‌باشد.

از نقطه نظر منابع تک فوتونی، نقاط کوانتومی نسبت به منابع SPDC ، بهتر محسوب می‌شوند. در این مواد، تولید حالت‌های تک فوتونی قطعیت دارند و واقعاً بر اساس تقاضا فراهم می‌شوند. به همین دلیل، توجه زیادی به این منابع، در آثار منتشر شده معطوف می‌شود. مسئله مهم دیگر این است که درصورتی‌که این منابع بتوانند با سیلیکون سازگار شوند، قابلیت جمع‌شدن با فناوری‌های موجود بر روی تراشه را خواهند داشت که نقاط کوانتومی این پتانسیل را دارند.

بهترین کاندید برای نقطه کوانتومی، به‌عنوان مولد حالت‌های درهم‌تنیده و یا تک فوتون، ترکیب نقطه‌ای InAs است که توسط ترکیباتی از AlGaAs و یا GaAs در ابعاد نانومتر، محدود می‌شود . به‌دلیل این محدودیت، ترازهای انرژی نقطه، از حالت نواری در ماد حجیم فاصله گرفته و دارای ترازهای باریک در فضای طیفی، شبیه اتم‌ها، می‌شوند (شکل ۱۵)[۳۵]، به‌نحوی‌که نقاط کوانتومی را اتم‌های مصنوعی لقب داده‌اند. مثلاً در نقطه کوانتومی InAs، تنها دو تراز در نوار ظرفیت به وجود می‌آید. با تحریک این سامانه و رفتن یک الکترون به تراز هدایت، یک ترکیب اکسیتونی (شبیه اتم هیدروژن) از الکترون و حفره به‌وجود می‌آید که تراز انرژی آن متناظر باحالت میانی دیاگرام انرژی شکل ۱۵ است.



[1] On-demand

شکل ۱۵: شکافتگی در نقاط کوانتومی نیم‌رسانا[۳۵].

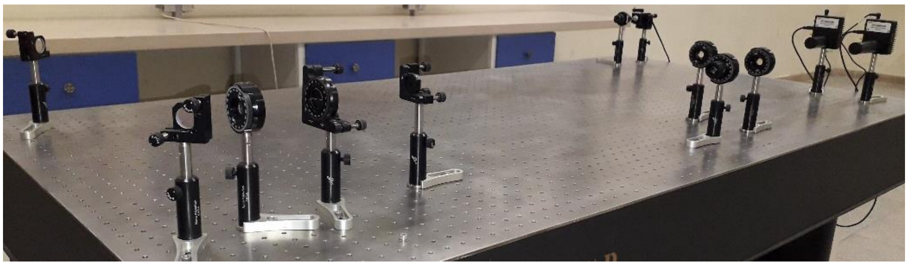
اگر دو الکترون تحریک شوند، تراز متناظر با دو اکسیتونی[1] که متناظر با بالاترین تراز نشان داده شده در شکل ۱۵ است، به‌وجود می‌آید. البته، به‌دلیل برهم‌کنش‌های مختلف، از جمله اسپین مدار و فونونی، انرژی حالت دو اکسیتونی دقیقاً دو برابر حالت تک اکسیتونی نمی‌شود. وقتی چنین سامانه‌ای تحریک می‌شود، آبشاری از فوتون‌های تک اکسیتونی به‌صورت متوالی منتشر می‌شود که درهم‌تنیده هستند. چون انرژی فوتون‌های اکسیتونی متوالی متفاوت و قابل‌تشخیص هستند، نور تولیدی کاملاً به‌صورت تک فوتونی تولید می‌شود و راهی برای تولید حالت‌های چند فوتونی وجود ندارد. در فرآیند SPDC، حالت‌های چند فوتونی می‌توانند تولید شوند. به همین دلیل، نقاط کوانتومی، به حالت‌های ایده‌آل تک فوتونی بسیار نزدیک‌ترند، و شمارش هم‌زمان بسیار کم متناظر با $g^2(0) \simeq 0.0004$ در آن‌ها به‌دست آمده است[۳۴]. علاوه‌براین، افزایش شدت خروجی در آن‌ها، برخلاف SPDC، به بدتر شدن وضعیت تک فوتونی نیز منجر نمی‌شود.البته، این رقم‌ها در دمای پایین حدود ۱۰K به‌دست می‌آیند. با این وجود، تولید حالت‌های هم‌بسته، بیشتر در طول‌موج‌های مرئی و فروسرخ نزدیک تحقق یافته و آزمایش‌های کمی با نقاط کوانتومی در طول‌موج‌های مورد علاقه ارتباطات کلاسیکی و البته کوانتومی (طول‌موج حدود ۱۵۵۰nm) صورت گرفته است. این طول‌موج در فیبرهای نوری (و حتی فضای آزاد)، دارای تلفات و یا پراکندگی حداقل است و چنین منابعی برای انتقال رمز و ارتباطات کوانتومی اهمیت دارند. چالش بعدی این است که به دلیل ضریب شکست بالای ترکیبات نیمه‌هادی در نقاط کوانتومی، نور تولیدی در درون نانوذره حبس می‌شود و استخراج آن دارای بازده کمی است. با ساخت ساختارهای پیچیده غیرمتقارن شبیه توری‌های پراش، توانسته‌اند این بازده را تا حدود ۶۵٪ افزایش دهند[۳۶]. نقاط کوانتومی نرخ‌های حدود ۱۰۶تا ۱۰۷ pairs/s را می‌توانند ارائه دهند. اگرچه افزایش آن به مقیاس‌های بالاتر نیز شدنی است اما، نباید فراموش کرد که نقاط کوانتومی، برخلاف کریستال‌های غیرخطی که در دمای اتاق کار می‌کنند، تنها در دماهای خیلی پایین دارای خلوص تک فوتونی بالا هستند. به عنوان مثال، افزایش دما در بازه ۱۰ تا ۸۰K باعث کاهش قابل‌توجه خلوص منبع تک فوتونی، متناظر با افزایش در بازه $g^2(0) \simeq 0.0004-0.34$ می‌گردد [۳۴]. بنابراین، فعلاً منابع SPDC به‌عنوان تنها منبع مطمئن و کم‌خرج منابع زوج-های درهم‌تنیده و تک فوتون، رقیبی ندارند اما، وضعیت ممکن است این‌گونه باقی نماند.

علاوه بر زوج‌های هم‌بسته فوتونی و منابع تک فوتون، نورهای غیرکلاسیکی دیگر همچون حالت‌های چگالیده نور نیز کاربردهای مهمی در مترولوژی کوانتومی دارند[۵, ۳۷-۴۰]. حالت‌های چگالیده نور نیز به‌صورت متداول توسط کریستال-های غیرخطی تولید می‌شوند. عملگر تحول زمانی یک سامانه توسط هامیلتونی برهم‌کنش توصیف می‌شود. در فرآیندهای غیرخطی در کریستال‌ها، هامیلتونی شامل جملات مرتبه دوم از عملگرهای خلق و نابودی فوتون است. بنابراین، هنگامی‌که عملگر یونیتاری تحول زمانی بر سامانه اعمال می‌شود، حالتی که در زمان بعدی تولید می‌شود یک حالت چگالیده است. حالت چگالیده در مقایسه باحالت همدوس متعارف، نوفهٔ میدان الکتریکی بسیار پایینی دارد.

حالت غیرکلاسیکی دیگری که می¬توان تولید کرد، حالت تعداد فوتونی است. می‌توان یک زوج درهم‌تنیده فوتونی تولید کرد و بر روی یک شاخه اندازه‌گیری انجام داد و شاخه دوم را در حالت تعداد فوتونی آماده نمود. در اصل، حالت‌های غیرکلاسیکی نور، تعداد بی‌شماری، به اندازه فضای هیلبرت خود (حالت‌های تعداد فوتونی) دارند. اما، مواردی که برخی از کمیت‌های مشاهده‌پذیر را کمینه و یا بیشینه می‌کنند، اهمیت دارند که مهم‌ترین آن‌ها در اینجا بررسی شدند.

در پایان، اشاره‌ای کوتاه به فعالیت‌های تیم ما در دانشگاه تهران خواهیم داشت. شکل ۱۶ نمونه‌ای از فرآیند SPDC را نشان می‌دهد که در آزمایشگاه اپتیک کوانتومی دانشگاه تهران راه‌اندازی شده است.

[1] Biexcitonic



شکل ۱۶: آرایش تجربی تولید فوتون‌های ۸۱۰nm توسط پرتو پمپی با طول‌موج ۴۰۵nm (آزمایشگاه اپتیک کوانتومی مؤسسه علوم و فناوری‌های کوانتومی دانشگاه تهران.

در این آزمایش زوج‌های فوتونی با نرخی از مرتبه $۱۰^۴$ به‌دست آمده‌اند. فوتون‌های تولیدی تبهگن در ناحیه طول‌موجی ۸۱۰nm واقع هستند که با پرتو پمپ ۴۰۵nm در کریستال غیرخطی BBO، تولید شده‌اند. ما در گام بعدی درصدد هستیم تا این منبع زوج را با استفاده از مشدد نوری ارتقا دهیم تا برای سنجش‌های مولکولی مناسب شود. سنجش کوانتومی و از راه دور مولکولی از برنامه‌های آتی این آزمایشگاه هستند. تصویربرداری از راه دور کوانتومی با منابع تک فوتون و سایر نورهای هم‌بسته، و تصویربرداری با تابش‌دهی کلاسیکی اما با شیوه‌های آشکارسازی کوانتومی، نیز از برنامه‌های مطالعاتی آینده این آزمایشگاه خواهند بود.

مراجع

[۱] Shigeki Takeuchi, Recent progress in single-photon and entangled-photon generation and applications, Jpn. J. Appl. Phys. 53 030101, 2014.

[۲] Christopher J. Chunnilall, Ivo Pietro Degiovanni, Stefan Kück, Ingmar Müller, Alastair G. Sinclair, Metrology of single-photon sources and detectors: a review, Optical Engineering, V. 53, 081910, 2014.

[۳] N. Prajapati, Z. Niu, and I. Novikova, "Quantum-enhanced two-photon spectroscopy using two-mode squeezed light," Optics Letters, vol. 46, pp. 1800-1803, 2021.

[٤] A. Motazedifard and S. A. Madani, "High-precision quantum transmittometry of DNA and methylene-blue using a frequency-entangled twin-photon beam in type-I SPDC," *OSA Continuum* vol. 4, pp. 1049-1069, 2021.

[٥] Christian Schimpf, Marcus Reindl, Francesco Basso Basset, Klaus D. Jöns, Rinaldo Trotta, and Armando Rastelli, Quantum dots as potential sources of strongly entangled photons: Perspectives and challenges for applications in quantum networks, Appl. Phys. Lett. 118, 100502, 2021.

[٦] C. Cahillane and G. Mansell, "Review of the Advanced LIGO gravitational wave observatories leading to observing run four," *Galaxies*, vol. 10, p. 36, 2022.

[۷] A. Aspect, J. Dalibard, and G .Roger, "Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers," *Physical review letters*, vol. 49, p. 1804, 1982.

[۸] P. Dong and Q. Chen, *LiDAR remote sensing and applications*: CRC Press, 2017.

[۹] L. D. Smullin; G. Fiocco, "Optical Echoes from the Moon". *Nature*, vol. 194 (4835), p. 1267, 1962.

[۱۰] Y. Shibata, C. Nagasawa, M. Abo, M. Inoue, I. Morino, and O. Uchino, "Comparison of CO2 Vertical Profiles in the Lower Troposphere between 1.6 µm Differential Absorption Lidar and Aircraft Measurements Over Tsukuba," *Sensors*, vol. 18, p. 4064, 2018.

[۱۱] R. Hao, J. Zhao, J. Liu, H. You, and J. Fang, "Remote Raman Detection of Trace Explosives by Laser Beam Focusing and Plasmonic Spray Enhancement Methods," *Analytical Chemistry*, vol. 94, pp. 11230-11237, 2022.

[۱۲] J. Li, Z. Yu, Z. Du, Y. Ji, and C. Liu, "Standoff chemical detection using laser absorption spectroscopy: a review," *Remote Sensing*, vol. 12, p. 2771, 2020.

[۱۳] L. M. Cantu and E. C. Gallo, "Explosives and warfare agents remote Raman detection on realistic background samples," *The European Physical Journal Plus*, vol. 137, p. 207, 20.۲۲

[۱٤] A. Abdallah, A. Mokhtar, H. Ayoub, and Y. Elbashar, "Experimental study on standoff detection of explosives traces using Laser Raman spectroscopy: challenges and possible solution," *Optical and Quantum Electronics,* vol. 54, pp. 1-14, 2022.

[۱٥] M. Bakhtbidar,A. M. Ghorbanzadeh, and A. Tasnim " A vehicle-based remote Methane detector using absorption molecular spectroscopy", 22nd Iranian Physical Chemistry Conference, 2019.

[۱٦] S .Lloyd, "Quantum illumination, " *arXiv preprint arXiv:0803.2022*, 2008.

[۱۷] D. G. England, B. Balaji, and B. J. Sussman, "Quantum-enhanced standoff detection using correlated photon pairs," *Physical Review A,* vol. 99, p. 023828, 2019.

[۱۸] D. Luong, S. Rajan, and B. Balaji, "Entanglement-based quantum radar: From myth to reality," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine,* vol. 35, pp. 22-35, 2020.

[۱۹] S. Barzanjeh, S. Pirandola, D. Vitali, and J. M. Fink, "Microwave quantum illumination using a digital receiver," *Science Advances,* vol. 6, p. eabb0451, 2020.

[۲۰] ح. محمودی، ع. م. قربانزاده، "آشکارسازی مولکولی توسط زوج‌های فوتونی درهم‌تنیده، پاییز ۱۳۹۹.

[۲۱] M. Gilaberte Basset, A. Hochrainer, S. Töpfer, F. Riexinger, P. Bickert, J. R. León-Torres, *et al.*, "Video-Rate Imaging with Undetected Photons," *Laser & Photonics Reviews,* vol. 15, p. 2000.۲۰۲۱ ,۳۲۷

[۲۲] R. S. Aspden, N. R. Gemmell, P. A. Morris, D. S. Tasca, L. Mertens, M. G. Tanner, *et al.*, "Photon-sparse microscopy: visible light imaging using infrared illumination," *Optica,* vol. 2, pp. 1049-1052, 2015.

[۲۳] A. Valencia, G. Scarcelli, M .D’Angelo, and Y. Shih, "Two-photon imaging with thermal light," *Physical review letters,* vol. 94, p. 063601, 2005.

[۲٤] C. L. Degen, F. Reinhard, and P. Cappellaro, "Quantum sensing," *Reviews of modern physics,* vol. 89, p. 035002, 2017.

[۲٥] J. P. Dowling, "Quantum sensors, computing, metrology, and imaging," in *Quantum Electronics and Laser Science Conference*, 2011, p. QTuJ3.

[۲٦] A. Motazedifard, S. A. Madani, and N. Vayaghan, "Measurement of entropy and quantum coherence properties of two type-I entangled photonic qubits," *Optical and Quantum Electronics,* vol. 53, pp. 1-26, 2021.

[۲۷] P. G. Kwiat, P. H. Eberhard, and A. G. White, "Ultra-bright source of polarization-entangled photons," ed: Google Patents, 2002.

[۲۸] K. Edamatsu, "Entangled photons: generation, observation, and characterization," *Japanese Journal of Applied Physics,* vol. 46, p. 7175, 2007.

[۲۹] A. Dousse, J. Suffczyński, A. Beveratos, O. Krebs, A. Lemaitre, I. Sagnes, *et al.*, "Ultrabright source of entangled photon pairs," *Nature,* vol ,٤٦٦ .pp. 217-220, 2010.

[۳۰] I. H. Agha, G. Messin, and P. Grangier, "Generation of pulsed and continuous-wave squeezed light with 87 Rb vapor," *Optics express,* vol. 18, pp. 4198-4205, 2010.

[۳۱] C. Couteau, "Spontaneous parametric down-conversion," *Contemporary Physics,* vol. 59, pp. 291-304, 2018.

[۳۲] T. J. Steiner, J. E. Castro, L. Chang, Q. Dang, W. Xie, J. Norman, *et al.*, "Ultrabright entangled-photon-pair generation from an Al Ga As-On-insulator microring resonator," *PRX Quantum,* vol. 2, p. 010337.۲۰۲۱ ,

[۳۳] O. Slattery, L. Ma, K. Zong, and X. Tang, "Background and review of cavity-enhanced spontaneous parametric down-conversion," *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology,* vol. 124, p. 1, 2019.

[۳٤] X. Cao, M. Zopf ,and F. Ding, "Telecom wavelength single photon sources," *Journal of Semiconductors,* vol. 40, p. 071901, 2019.

[۳٥] J. D. Plumhof, R. Trotta, A. Rastelli, and O. G. Schmidt, "Experimental methods of post-growth tuning of the excitonic fine structure splitting in semiconductor quantum dots," *Nanoscale research letters,* vol. 7, pp. 1-11, 2012.

[۳٦] J. Liu, R. Su, Y. Wei, B. Yao, S. F. C. d. Silva, Y. Yu, *et al.*, "A solid-state source of strongly entangled photon pairs with high brightness and indistinguishability," *Nature nanotechnology,* vol. 14, pp. 586-593, 2019.

[۳۷] B. J. Lawrie, P. D. Lett, A. M. Marino, and R. C. Pooser, "Quantum sensing with squeezed light," *Acs Photonics*, vol. 6, pp. 1307-1318, 2019.

[۳۸] B. K. Malia, Y. Wu, J. Martínez-Rincón, and M. A. Kasevich, "Distributed quantum sensing with mode-entangled spin-squeezed atomic states," *Nature*, pp. 1-5, 2022.

[۳۹] J. A. H. Nielsen, "Generation and Application of Squeezed States of Light in Quantum Sensing," 2021.

[۴۰] L.-A. Wu, H. Kimble, J. Hall, and H. Wu, "Generation of squeezed states by parametric down conversion," *Physical review letters*, vol. 57, p. 2520, 1986.