

مقاله علمی-ترویجی

مروری بر حسگرهای کوانتومی

پریناز سیف الدینی/دانشجوی دکتری نانوالکترونیک/ دانشکده فنی و مهندسی/ دانشگاه تهران/ seifaddini@ut.ac.ir

حسین آقابابا / استادیار مهندسی برق / دانشکده فنی و مهندسی / دانشگاه تهران / aghababa@ut.ac.ir

چکیده

سنجش کوانتومی با استفاده از سیستم کوانتومی، خواص کوانتومی یا پدیده‌های کوانتومی، اندازه‌گیری یک مقدار فیزیکی را توصیف می‌کند. حسگرهای کوانتومی می‌توانند به حساسیت‌هایی برسند، که طبق قوانین متعارف فیزیک که زندگی روزمره را کنترل می‌کنند، غیرممکن باشد. این سطح حساسیت تنها به لطف دنیای مکانیک کوانتومی با خواص جذاب آن، مانند برهم‌نهی که در آن اتم می‌تواند در آن واحد در دو تراز مختلف انرژی باشد، قابل حصول است. نمونه‌های تاریخی حسگرهای کوانتومی شامل مغناطیس‌سنجی‌ها مبتنی بر دستگاه‌های تداخل کوانتومی ابررسانا و بخارات اتمی یا ساعت‌های اتمی است. به تازگی، سنجش کوانتومی به یک شاخه مجزا از تحقیقات در حال رشد در حوزه علم و فناوری کوانتومی تبدیل شده است، با رایج‌ترین سطوح که به کیوبیت‌های اسپینی، یون‌های به دام افتاده و کیوبیت‌های شار می‌پردازند. انتظار می‌رود این زمینه فرصت‌های جدیدی را با توجه به حساسیت و دقت بالا در فیزیک کاربردی و سایر زمینه‌های علمی فراهم کند. در این بررسی، مقدمه‌ای بر اصول اساسی، مفاهیم و کاربردهایی از حسگرهای کوانتومی ارائه خواهد شد.

کلمات کلیدی: سنجش کوانتومی، حسگر کوانتومی، تکنولوژی کوانتومی.

Review of Quantum Sensors

Parinaz Seifaddini/ Department of Electrical and Computer Engineering/ Faculty of Engineering/ University of Tehran/ Tehran, Iran
seifaddini@ut.ac.ir

Hossein Aghababa*/ Department of Electrical and Computer Engineering/ Faculty of Engineering/ University of Tehran/ Tehran, Iran
aghababa@ut.ac.ir

*Corresponding Author

Abstract

Using quantum systems, properties or phenomena are particular ways to measure a physical quantity. Quantum sensors are eligible to reach sensitivities that are not justifiable due to the usual physics laws. This level of sensitivity is only accessible by the quantum mechanic world and its inspiring features such as the possibility for simultaneous atoms presence at the two different energy bands. Magnetometers based on superconductive quantum interference systems or atomic clocks are historic examples of quantum sensors. Recently, quantum sensing has become a separate branch of progressing investigations in quantum science and technology, which points to spin qubits, trapped ions, and flux qubits. According to

the high sensitivity and accuracy of the quantum sensors, it can open many new opportunities in the realm of applicable physics and other scientific fields. In this study, we present an introduction to basic principles, concepts, and applications of quantum sensors.

Keywords: Quantum measurement, Quantum sensor, Quantum technology.

۱- مقدمه

فناوری کوانتومی شامل محاسبات، ارتباطات، تصویربرداری و حسگرها است. آخرین مورد از این چهار زمینه، حسگرهای کوانتومی است، که داده‌های کیفی جدیدی را در مورد جهان ما ارائه می‌دهند، که می‌توانند به اطلاعات ارزشمندی در مورد محیط‌زیست ما تبدیل شوند. حسگرهای کوانتومی با خصوصیات قابل توجه از جمله حساس‌تر، دقیق‌تر و پایدارتر از فناوری کوانتومی، می‌توانند موجب تغییر در کارایی شوند. این حسگرها می‌توانند منجر به کاربردهای جدیدی شوند، که فقط با چنین بهبودهایی امکان‌پذیرند و کاربردهایی در زمینه هوا فضا، اقلیم، ساخت‌وساز، دفاع، انرژی، سلامت، امنیت، حمل و نقل و آب را در برمی‌گیرد، که قابل عرضه به بازارهای بزرگ می‌باشد.

حسگرهای کوانتومی، روی ضعف سیستم‌های کوانتومی یا در واقع حساسیت قوی آن‌ها به اختلالات خارجی، سرمایه‌گذاری می‌کنند. این روند در فناوری کوانتومی، یادآور تاریخ نیمه‌رساناهاست. بسیاری از دانشمندان معتقدند که کوانتوم از اولین موفقیت تجاری واقعی‌اش در حسگری لذت خواهد برد. اگرچه سنسج کوانتومی به عنوان یک حوزه پژوهشی جدا در علوم کوانتومی و مهندسی، کاملاً جدید است، اما بسیاری از مفاهیم آن در جامعه فیزیک، به خوبی شناخته شده و از دهه‌ها توسعه در طیف‌سنجی وضوح بالا، به ویژه در فیزیک اتمی و تشدید مغناطیسی، حاصل شده است. مثال‌های مهم در این زمینه، ساعت‌های اتمی، مغناطیس‌سنج‌های بخار اتمی و دستگاه‌های تداخل کوانتومی ابررسانا هستند. ابزارهایی که می‌توانند لقب جدید در حوزه سیستم‌های کوانتومی بگیرند، به طور فزاینده‌ای در سطح تک‌اتمی بررسی می‌شوند، جایی که از درهم‌تنیدگی به عنوان منبعی برای افزایش حساسیت استفاده می‌شود و سیستم‌های کوانتومی و دستکاری‌های کوانتومی به‌طور ویژه برای اهداف حسگری، طراحی و مهندسی می‌شوند [۱].

این پژوهش ابتدا با ارائه برخی از تعاریف اساسی برای سنسج کوانتومی و با ذکر معیارهای ابتدایی برای در نظر گرفتن یک سیستم کوانتومی به‌عنوان حسگر کوانتومی آغاز می‌شود، سپس به معرفی انواع حسگرهای کوانتومی و کارهایی که در این زمینه انجام شده پرداخته شده است. در ادامه نحوه تجاری‌سازی و پرکاربردترین حسگرهایی که وارد بازار شده‌اند شرح داده شده و در نهایت با چشم‌انداز مختصری در مورد آینده ممکن این حسگرها و نتیجه‌گیری در مورد هر آنچه که در این مقاله بررسی شد این بحث به پایان می‌رسد.

۱-۱- تعریف موضوع تحقیق

۱-۱-۱- سنسج کوانتومی

عبارت سنسج کوانتومی، به‌طور معمول برای توصیف یکی از موارد زیر استفاده می‌شود:

۱- استفاده از یک شی کوانتومی برای اندازه‌گیری یک کمیت فیزیکی (کوانتومی یا کلاسیکی). شی کوانتومی، با سطوح انرژی کوانتیده مشخص می‌شود، به‌عنوان مثال حالات ارتعاشی، مغناطیسی یا الکترونی کیوبیت‌های اسپینی یا ابررسانا یا اتم‌های خنثی.

۲- استفاده از همدوسی کوانتومی (یعنی حالات برهم نهی زمانی یا

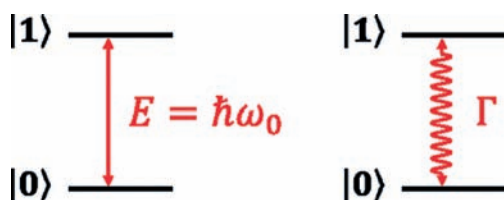
فضایی موج مانند) برای اندازه‌گیری یک کمیت فیزیکی. ۳- استفاده از درهم‌تنیدگی کوانتومی^۲ برای بهبود حساسیت یا دقت یک اندازه‌گیری، فراسوی چیزی که به‌طور کلاسیکی، ممکن است. از این سه تعریف، دو مورد اول، گسترده‌تر بوده و بسیاری از سیستم‌های فیزیکی را پوشش می‌دهند، حتی برخی از سیستم‌هایی که به‌طور کامل کوانتومی نیستند؛ مثلاً تداخل موج کلاسیکی که در سیستم‌های نوری یا مکانیکی ظاهر می‌شود. سومین تعریف، یک تعریف به‌درستی کوانتومی است. با این حال، از آنجایی که حسگرهای کوانتومی تعاریف یک و دو، اغلب به کاربردها نزدیک‌تر هستند، بیشتر بر آن‌ها تمرکز خواهد شد [۱].

۱-۱-۲- حسگرهای کوانتومی

مشابه با معیارهای دیوینچنزو^۳ برای محاسبات کوانتومی، می‌توان مجموعه‌ای از چهار ویژگی لازم برای یک سیستم کوانتومی برای عمل به‌عنوان یک حسگر کوانتومی را لیست کرد. این ویژگی‌ها شامل سه معیار اصلی دیوینچنزو می‌شود:

۱- سیستم کوانتومی، سطوح انرژی قابل حل و گسسته دارد. به‌طور خاص، ما این سیستم را، یک سیستم دوترانه با یک حالت انرژی پایین‌تر $|0\rangle$ و یک حالت انرژی بالاتر $|1\rangle$ ، که به‌وسیله یک انرژی گذار $E = \hbar\omega_0$ جدا می‌شوند، فرض خواهیم کرد. (شکل ۱). ۲- آماده‌سازی سیستم کوانتومی به یک حالت شناخته‌شده و خواندن حالتش، ممکن است

۳- سیستم کوانتومی می‌تواند به‌طور همدوس، به‌طور معمول با میدان‌های وابسته به زمان دستکاری شود. این شرط، به‌طور قطع برای تمام پروتکل‌ها لازم نیست، مثال‌هایی مانند، طیف‌سنجی موج پیوسته یا اندازه‌گیری‌های سرعت آسایش این معیار را ندارند.



شکل ۱: شکل‌های سیستم کوانتومی دو حالت؛ که $|0\rangle$ حالت انرژی پایین و $|1\rangle$ حالت انرژی بالا می‌باشد [۱]

تمرکز روی سیستم‌های دوترانه ۱، یک محدودیت سخت نیست، زیرا بسیاری از ویژگی‌های سیستم‌های کوانتومی پیچیده‌تر می‌توانند از طریق یک حسگر کیوبیتی مدل شوند. چهارمین ویژگی، مختص حسگری کوانتومی است.

۴- سیستم کوانتومی با یک کمیت فیزیکی $v(t)$ ، مانند یک میدان الکتریکی یا مغناطیسی برهمکنش می‌کند. برهمکنش، با یک پارامتر عبور یا جفت‌شدگی به فرم $\hat{V} = \hat{v} \cdot \hat{q}$ که تغییرات انرژی گذار E را به تغییرات پارامتر خارجی V مربوط می‌کند، سنجیده می‌شود. بیشتر مواقع، جفت‌شدگی یا خطی ($q=1$) و یا مربعی ($q=2$) است. برهمکنش با پارامتر خارجی، منجر به یک

جابه‌جایی در ترازهای انرژی سیستم کوانتومی یا انتقالات بین سطوح انرژی می‌شود [۱].

۲- انواع حسگرهای کوانتومی

در این بخش مروری بر معرفی برخی حسگرهای کوانتومی، مکانیزم حسگری آن‌ها و همچنین مهم‌ترین آزمایشات انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود:

۲-۱- ابرهای اتمی سرد

ظهور سردسازی لیزری در دهه ۱۹۸۰، منجر به انقلابی در حسگری اتمی شد. رایج شدن سرعت کاهش یافته اتم‌های سرد، حسگری با زمان‌های طولانی‌تر را با استفاده از اتم‌های محدود به لحاظ فضایی امکان‌پذیر کرد، که در طول مسیرهای خاص در خلا یا تله، سقوط آزاد می‌کردند. سقوط آزاد اتم‌ها، توسعه‌ی گرانش‌سنج‌های اتمی و ژيروسکوپ‌ها را امکان‌پذیر کرده است. در این دستگاه‌ها، یک ابر اتمی، شتاب را با حسگری جابه‌جایی فاز فضایی یک پرتوی لیزر در طول مسیر سقوط آزادش، اندازه می‌گیرد. اتم‌های به دام افتاده، برای آشکارسازی و تصویربرداری میدان‌های مغناطیسی در مقیاس میکرو به کار گرفته شده‌اند. بی‌شک پیشرفته‌ترین اثبات‌های حسگری کوانتومی در هم تنیدگی بهبود یافته، در اتم‌های سرد به دام افتاده و سلول‌های بخار، اجرا شده‌اند. در هم تنیدگی به شکل فشردگی اسپین، با اندازه‌گیری‌های غیرمخرب نوری جمعیت اتمی و برهمکنش‌های اتمی تولید شده است [۱].

۲-۱-۱- تداخل‌سنج اتمی سرد چند محوره

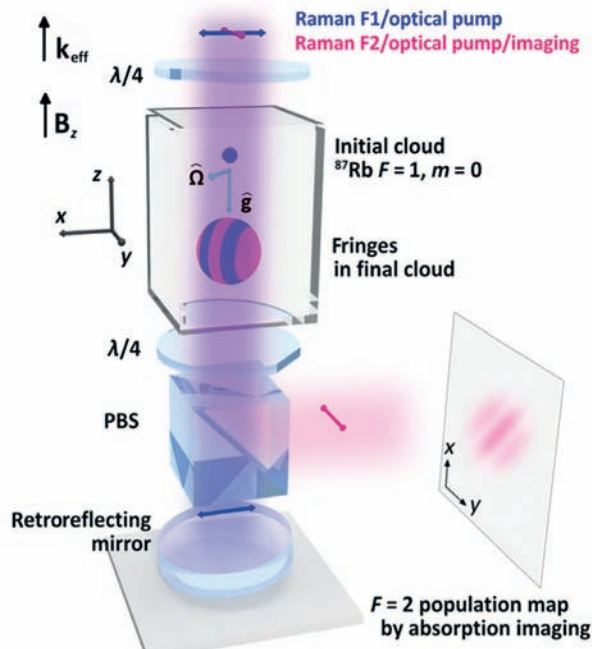
محققان موسسه ملی استاندارد و فناوری (NIST)، ژيروسکوپ اتمی خود را از لحاظ توانایی‌های اندازه‌گیری چندکاره و اندازه‌گیری‌های دقیق، ارتقا داده‌اند. تداخل‌سنج اتمی می‌تواند در ناوبری و زمین‌شناسی (مطالعه شکل زمین براساس اندازه‌گیری گرانش) به دلیل حساسیت آن به شتاب و چرخش همراه با ثبات و دقت مورد استفاده قرار گیرد.

ساختار ژيروسکوپ، یک محفظه شیشه‌ای با حجم ۱ سانتی‌متر مکعب حاوی حدود ۱۰ میلیون اتم روبیدیوم سرد است که به دام می‌افتند و رها می‌شوند (شکل ۲).

حساسیت‌های ژيروسکوپ NIST برای بزرگی و جهت اندازه‌گیری چرخش به ترتیب ۰/۳۳ درجه در ثانیه و ۰/۲۷ درجه با زمان متوسط یک ثانیه است. علاوه بر این، ژيروسکوپ NIST از این جهت منحصر به فرد است، که می‌تواند چرخش‌ها را در طول دو محور و شتاب در امتداد یک محور به‌طور همزمان با یک منبع واحد اتم اندازه‌گیری کند.

در این ژيروسکوپ، هنگامی که اتم‌ها ابتدا در یک ابر به دام می‌افتند، تحت اثر جاذبه قرار گرفته و رها می‌شوند، پرتوی لیزر باعث می‌شود، که آن‌ها از بین دو حالت انرژی عبور کنند. این فرآیند شامل جذب و انتشار ذرات سبک است، که به حرکت اتم‌ها می‌انجامد و باعث می‌شود که امواج ماده آن‌ها از هم جدا شوند و بعداً باز ترکیب شوند. هنگامی که اتم‌ها سرعت یا چرخش می‌یابند، امواج ماده آن‌ها تغییر می‌کنند و به روش‌های قابل پیش‌بینی تداخل می‌یابند.

اتم‌ها با درخشش پرتو لیزر ضعیف دوم از طریق ابر، تصویر می‌شوند. از آنجاکه اتم‌ها در حالت‌های مختلف انرژی، نور فرکانس‌های مختلف را جذب می‌کنند، تصاویر نوارهای مداخله‌ای از جمعیت اتم را در دو حالت مختلف نشان می‌دهند. سرعت چرخش و محور چرخش با تجزیه و تحلیل فاصله و جهت باندهای تداخل در ابر اتم و شتاب از تغییرات در موقعیت باند مرکزی اندازه‌گیری می‌شود [۲].



شکل ۲: سلول خلاء شیشه‌ای و اپتیک‌های بسته علمی PSI. ابعاد داخلی سلول شیشه‌ای ۲۱cm است. ابزار شتاب را در جهت z و تصویربرداری چرخشی را روی صفحه x-y اندازه می‌گیرند. [۲]

۲-۱-۲- پایدارسازی بخار فلزات قلیایی به کمک نانوذرات طلا

روشی که دانشمندان برای پایدار کردن چگالی بخار فلز قلیایی ابداع کرده‌اند، استفاده از نانوذرات طلا است. دانشمندان با پوشاندن دیواره داخلی ظروف به‌وسیله‌ی نانوذرات طلا که ۳۰۰ هزار برابر کوچک‌تر از قطر یک سنجاق هستند، یک روش هوشمندانه برای کنترل بخار طراحی کرده‌اند. وقتی نور سبز لیزر به نانوذرات طلا تابیده می‌شود، آن‌ها نور را به سرعت جذب کرده و به گرما تبدیل می‌کنند، که باعث می‌شود بخار گرم شده و هزار برابر سریع‌تر از روش‌های دیگر، درون ظرف پخش شود. این فرآیند به شدت، تجدیدپذیر است؛ علاوه بر این، دانشمندان دریافتند پوشش جدید نانوذرات طلا، حالت‌های کوانتومی اتم‌های فلز قلیایی را حفظ می‌کند.

نتایج این پژوهش در سردسازی اتمی، ساعت‌های اتمی و طیف‌سنجی با وضوح بالا، قابل استفاده است. پوشش نانوذرات طلا، کنترل بیرونی و سریع چگالی بخار و عمق اپتیکی مربوطه را امکان‌پذیر می‌کند [۳].

۲-۲- اتم‌های ریدبرگ^۵

اتم‌های ریدبرگ (اتم‌هایی در بالاترین حالات الکترونی برانگیخته)، حسگرهای کوانتومی مهمی برای میدان‌های الکتریکی هستند. در یک تصویر کلاسیکی، الکترون با تقید کمتر در یک مدار برانگیخته بالا، به راحتی توسط میدان الکتریکی، جابه‌جا می‌شود. در یک تصویر کوانتومی، حالات حرکتی آن با گذارهای دو قطبی الکتریکی قوی جفت می‌شود و جابه‌جایی‌های قوی استارک^۶ را تجربه می‌کند. تهیه و خواندن حالات، از طریق طیف‌سنجی و برانگیختگی لیزر، ممکن است.

یکی از برجسته‌ترین کاربردهای اتم‌های ریدبرگ در خلا، استفاده از آن‌ها به‌عنوان آشکارسازهای تک‌فوتون برای فوتون‌های ریزموج در یک کاواک کرایونیک در یک سری آزمایش‌هایی است که در جایزه نوبل فیزیک سال ۲۰۱۲ مشهور شدند. این حساسیت به‌تازگی بهبود داده شده با به‌کارگیری شرودینگر که حالات را به سطح $30 \text{ nV/m}/\sqrt{\text{Hz}}$ ساده است. به‌تازگی حالات ریدبرگ در سلول‌های

بخار اتمی، قابل دسترس شده‌اند. این حسگرها برای حس کردن میدان‌های الکتریکی ضعیف، بیشتر در محدوده فرکانسی گیگاهرتز به کار گرفته شده‌اند [۱].

۲-۲-۱- به دام انداختن اتم‌های ریدبرگ به روش هولوگرافیکی

باردو^۷ و همکارانش یک روش هولوگرافیکی را ثابت کرده‌اند، که می‌تواند اتم‌های منفرد ریدبرگ را در الگوی نوری سه‌بعدی در مکانی با دقت میکرومتر، که مورد نیاز کاربردهای اطلاعات کوانتومی است، نگه دارند. قبل از این، محدودسازی سه‌بعدی تنها با دقت میلی‌متر و با استفاده از میدان‌های الکتریکی یا مغناطیسی قابل دستیابی بود. روش کار به این صورت بود، که آن‌ها کار خود را با یک اتم منفرد روبیدیم خنثی که با استفاده از انبرک‌های نوری استاندارد به دام انداخته بودند، شروع کردند و سپس با غیرفعال کردن انبرک‌ها، اتم را به حالت ریدبرگ برانگیخته کردند، سپس بلافاصله اتم را در مرکز یک الگوی سه‌بعدی از شدت نور به دام انداختند. نتیجه این می‌شود که، الگوی سه‌بعدی نور با پراش یک اشعه‌ی لیزر منتشر شده از یک مدولاتور نوری فضایی ایجاد می‌شود، که تداخل امواج، یک محل تاریک به وجود می‌آورد. آن‌ها دریافتند که می‌توانند یک اتم را به مدت ۲۲۸ میکروثانیه در دمای اتاق، در حالت برانگیخته‌ی ریدبرگ نگه دارند. در این مدت، آن‌ها از ریزامواج برای جابه‌جایی اتم بین دو سطح ریدبرگ استفاده کردند. همچنین برهمکنش‌های بین اتم‌های ریدبرگ را با وادار کردن اتم‌های موجود در تله‌های مجاور به جابه‌جایی حالت‌ها ثابت کردند. این برهمکنش‌ها برای ایجاد گیت‌های منطقی کوانتومی ضروری هستند [۴].

۲-۲-۲- حسگر تراهرتز

فیزیکدانان کوانتومی به حسگری کوانتومی به‌عنوان روشی جذاب برای دستیابی به نواحی طیفی و آشکارسازی فوتون‌ها (بسته‌های ریز تشکیل دهنده نور) که به‌طور عموم به لحاظ تکنیکی چالش برانگیز هستند، تکیه می‌کنند. آن‌ها می‌توانند اطلاعات نمونه را در نواحی طیفی مورد علاقه جمع‌آوری کرده و جزئیات آن را از طریق همبستگی‌های دو فوتون و با استفاده از آشکارسازهای بسیار حساس، به یک گستره طیفی دیگر منتقل کنند. این کار به‌ویژه برای آشکارسازی تابش تراهرتز بدون آشکارسازهای نیمه‌رسانا، که در آن فیزیکدانان باید به جای آن از طرح‌های آشکارسازی همدوس یا بولومترهای سرد شده به روش کرایونیک استفاده کنند، مفید است. در این مقاله، کوتاس و همکارانش فوتون‌های تراهرتز (ایدلر) را توسط تبدیل پایین پارامتریک خود به خودی (SPDC)^۸ و با استفاده از فوتون‌های پمپ در ۶۶۰ نانومتر تولید کردند، تا فوتون‌های سیگنال در طول موجی در حدود ۶۶۱ نانومتر (بسیار نزدیک به طیف طول موج پمپ) را تولید کنند. انرژی اندک فوتون‌های ایدلر در گستره تراهرتز، سهم قابل توجهی از افت و خیزهای حرارتی را دریافت کردند تا در حالت گرمایی قرار گیرند.

دانشمندان از یک لیزر حالت جامد فرکانس دو برابر شده با طول موج ۶۶۰ نانومتر به‌عنوان منبع پمپ کننده استفاده کرده و این فوتون‌ها را با استفاده از یک توری براگ حجمی (VBG)^۹ با تداخل سنج جفت کردند. آن‌ها یک بلور PPLN^{۱۰} (لیتیوم نیوبات با قطبش تناوبی) و تناوب قطبش را به‌عنوان محیط غیرخطی انتخاب کردند، تا فوتون‌های مرئی (سیگنال) و فوتون‌های ایدلر متناظر، در ناحیه تراهرتز را تولید کنند. محققان، یک شیشه با پوشش ITO^{۱۱} را به‌منظور تفکیک فوتون‌های ایدلر از فوتون‌های پمپ و سیگنال، در پشت بلور قرار دادند؛ سپس به‌طور مستقیم تابش پمپ و سیگنال را با استفاده از یک آینه مقعر به داخل بلور متمرکز کردند. از آنجا که ضریب شکست

لیتیوم نیوبات (LiNbO₃) در گستره فرکانسی تراهرتز منجر به یک زاویه پراکندگی بزرگ پرتوهای ایدلر می‌شود، آن‌ها با استفاده از یک آینه سهموی، این پرتوها را جمع‌آوری کرده و تابش ایدلر را از یک آینه تخت که روی یک پایه خطی پیزوالکتریک قرار داشت، منعکس کردند. آن‌ها پس از دو بار عبور از بلور، باریک‌های پمپ و سیگنال را جمع‌آوری کرده و فوتون‌های پمپ را با استفاده از سه توری براگ حجمی، فیلتر کردند. این گروه از یک دوربین نیمه رسانای فلز-اکسید مکمل علمی (sCMOS) سردنشده به‌عنوان آشکارساز استفاده کردند.

به این ترتیب، میرکو کوتاس و همکارانش، تداخل کوانتومی در گستره فرکانسی تراهرتز را با انتشار فوتون‌های تراهرتز در فضای آزاد، مشاهده کردند. آن‌ها ظرفیت استفاده از این تکنیک برای تعیین ضخامت نواحی مختلف PTFE را به‌عنوان شاهدهی بر کاربردهای گستره فرکانسی تراهرتز نشان دادند [۵].

۲-۲-۳- حسگر میدان الکتریکی باند گسترده

یک حسگر کوانتومی می‌تواند به سربازان در تشخیص سیگنال‌های ارتباطی، در تمام طیف فرکانس رادیویی از ۰ تا ۱۰۰ گیگاهرتز کمک کند. چنین پوشش طیف گسترده‌ای توسط یک آنتن واحد با یک سیستم گیرنده سنتی غیرممکن است، و نیاز به چندین سیستم آنتن، تقویت‌کننده و اجزای دیگر دارد.

در سال ۲۰۱۸ دانشمندان ارتش اولین افراد در جهان بودند که گیرنده کوانتومی را ایجاد کردند، که از اتم‌های بسیار هیجان‌انگیز و فوق‌العاده حساس - معروف به اتم‌های ریدبرگ - برای شناسایی سیگنال‌های ارتباطی استفاده می‌کرد. حسگرهای جدید می‌توانند بسیار کوچک و عملاً غیرقابل تشخیص باشند و مزیت‌های منحصر به فردی را برای سربازان فراهم کنند. حسگرهای مبتنی بر اتم ریدبرگ اخیراً برای کاربردهای سنسجش میدان الکتریکی عمومی از جمله به‌عنوان گیرنده ارتباطات در نظر گرفته شده‌اند. برای ارزیابی کاربردهای بالقوه، دانشمندان ارتش تجزیه و تحلیل حساسیت حسگر ریدبرگ در برابر نوسانات میدان‌های الکتریکی را در طیف عظیمی از فرکانس‌ها از ۰ تا ۱۰۱۲ هرتز انجام دادند. نتایج نشان داد که حسگر ریدبرگ می‌تواند سیگنال‌های قابل اعتماد را در کل طیف تشخیص داده و با سایر فن‌آوری‌های حسگر میدان الکتریکی موجود، مانند کریستال‌های الکترونیکی و الکترونیک غیرفعال آنتن قطبی مقایسه کند.

با استفاده از مکانیک کوانتومی می‌توان کالیبراسیون حسگر و عملکرد نهایی را به میزان بسیار بالایی شناخت که این برای هر حسگری یکسان است. این کار از اولویت‌های نوسازی ارتش در شبکه‌های رایانه‌ای نسل بعدی و از موقعیت امن، هوانوردی و زمان‌بندی پشتیبانی می‌کند، زیرا می‌تواند مفاهیم جدید ارتباطات یا رویکردهای تشخیص سیگنال‌های RF برای جغرافیایی را تحت تاثیر قرار دهد [۶].

۲-۳- ساعت‌های اتمی

در نگاه اول، به نظر می‌رسد ساعت‌های اتمی (کیوبیت‌هایی با گذارهایی آنقدر غیرحساس که شکافتگی تراز آن‌ها می‌تواند به‌صورت مطلق در نظر گرفته شده و به‌عنوان یک مرجع فرکانسی به کار گرفته شود) نمی‌توانند به‌عنوان حسگرهای کوانتومی در نظر گرفته شوند، زیرا تعریف آن‌ها، معیار ۴ ذکر شده در تعریف حسگرها را نقض می‌کند. با این حال عملکرد آن‌ها به‌عنوان ساعت، پروتکل‌های یکسانی مانند عملکرد حسگرهای کوانتومی به کار می‌گیرد، تا مدام گذار کیوبیت را با فرکانس یک نوسانگر محلی غیرپایدار مقایسه کند. بنابراین یک ساعت اتمی می‌تواند به‌عنوان یک حسگر کوانتومی که

رانش فاز یک نوسانگر محلی را اندازه‌گیری و پایدار می‌کند، در نظر گرفته شود. پیشرفته‌ترین ساعت‌های اتمی امروزی، گذارهای نوری را در تک‌یون‌ها یا ابرهای اتمی به دام افتاده در یک شبکه نوری به کار می‌گیرند [۱].

۲-۳-۱- ساعت اتمی با استفاده از انبرک نوری

نورسیا^{۱۲} و همکارانش طرح یک ساعت اتمی نوین را ثابت کرده‌اند، که ترکیبی از عملیات به‌طور تقریبی پیوسته با سیگنال‌های قوی و پایداری بالاست. ویژگی‌هایی که به‌طور همزمان، در هیچ یک از انواع ساعت‌های اتمی فعلی وجود ندارد. این ساعت جدید، از انبرک‌های لیزری برای به‌دام انداختن، کنترل و منزوی کردن اتم‌ها استفاده می‌کند. بستر این ساعت جدید، آرایه‌ای از بیش از ۱۰ اتم استرانسیم است، که به‌صورت جداگانه توسط ۱۰ انبرک نوری محدود شده‌اند. این انبرک‌های نوری توسط اشعه‌ی لیزر مادون قرمز ساخته شده‌اند، که روی یک نقطه کوچک متمرکز می‌شود. امواج رادیویی در ۱۰ فرکانس متفاوت و به‌صورت پی‌درپی به یک منحرف‌کننده‌ی خاص اعمال می‌شوند، تا ۱۰ نقطه‌ی نوری را برای به‌دام انداختن اتم‌های جداگانه بسازند.

تله‌ها، هر چند ثانیه، از یک ابر از پیش سرد شده از اتم‌های دارای همپوشانی با نور انبرک پر می‌شوند و اتم‌های نگه‌داشته‌شده به‌سیله‌ی انبرک‌ها، با یک لیزر پایدار شده به‌وسیله‌ی کاواک بلوری سیلیکونی برانگیخته می‌شوند، جایی که نور در یک فرکانس خاص، به جلو و عقب جهش می‌کند. نور لیزر ساعت به‌صورت عمود بر نور انبرک و در طول یک میدان مغناطیسی اعمال می‌شود. تصویربرداری غیرمخرب نشان می‌دهد که آیا اتم‌ها به درستی کار می‌کنند یا نه، اتم‌ها وقتی در حالت انرژی پایین‌تر باشند، فقط نور تابش می‌کنند یا فلورسانس دارند. ساعت انبرک حتی می‌تواند یک اتم منفرد را به‌سرعت به تله اندازه‌کند که به این معناست که تداخل کمتری وجود دارد و شما سیگنال پایداری را برای زمان طولانی‌تر می‌گیرید. ساعت انبرک کارایی ۹۶٪ را دارا است، زیرا مدت کوتاهی وقفه نیاز دارد تا اتم‌های جدیدی آماده کند [۱۷].

۲-۴-۱- اسپین حالت جامد- حسگر مجموعه‌ای

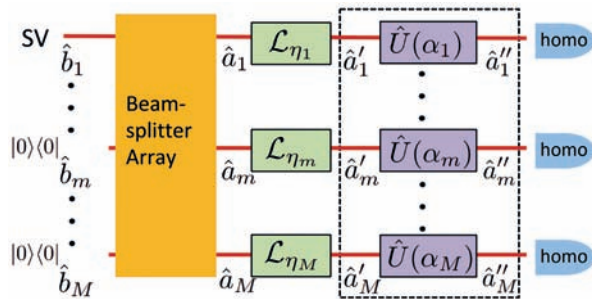
۲-۴-۱-۱- حسگرهای مجموعه‌ای NMR

برخی از نخستین حسگرهای کوانتومی، براساس مجموعه‌های اسپین‌های هسته‌ای ساخته شده‌اند. در این دسته، حسگرهای میدان مغناطیسی، قدرت میدان را از فرکانس لارمور^{۱۳} استنتاج می‌کنند، که اسپین‌ها از طریق تعادل گرمایی در یک میدان خارجی، آماده‌سازی می‌شوند. اگرچه حساسیت این دستگاه‌ها (۱۰ pT/√Hz) نسبت به هم‌تایان اتمی آن‌ها زیاد نیست، اما به لطف سادگی و استحکامشان، به‌طور وسیعی در زمین‌شناسی، باستان‌شناسی و ماموریت‌های فضایی استفاده می‌شوند. در پیشرفته‌ترین پیاده‌سازی‌ها، تغییر اسپین هسته‌ای به‌وسیله‌ی یک مغناطیس‌سنج اتمی خوانده می‌شود، در این آزمایشات به حساسیت 10^{-2} rad/s/√Hz رسیدند [۱].

۲-۴-۲- حسگر توزیع‌یافته همبستگی کوانتومی

حسگرهای کوانتومی توزیع‌یافته از همبستگی کوانتومی بین چندین حسگر کوانتومی استفاده می‌کنند تا پارامترهای مجهول را با دقتی فراتر از سیستم‌های غیر درهم‌تنیده اندازه‌گیری کنند. در این مقاله از طرحی استفاده می‌شود که در آن درهم‌تنیدگی چندپاره‌ای متغیر- پیوسته به عنوان ابزاری برای افزایش حساسیت کاربرد دارد. در این طرح، یک حالت خلاء از طریق آرایه‌ای از بیم-اسپلیترهای بدون اتلاف بین حسگرهای مختلف شبکه تقسیم می‌شود، که نتیجه آن این است که، خطای rms تخمین پارامتر مورد نظر با نسبت عکس

با تعداد حسگرها مقیاس می‌شود، حدی که آن را حد هایزنبرگ می‌گویند. این در حالی است که در صورتی که بین اجزای شبکه درهم‌تنیدگی وجود نداشته باشد، این خطای تخمین با نسبت عکس مجذور تعداد حسگرها رابطه دارد، حدی که آن را حد استاندارد کوانتومی می‌گویند. در این شبکه، هر چه که اتلاف بیشتر باشد، دقت اندازه‌گیری رو به نزول پیش می‌رود، ولی نکته‌ای که وجود دارد این است که برای مقادیر میانه اتلاف همچنان شرایط برای بهبود خطا وجود دارد. این طرح حسگرهای توزیع یافته می‌تواند برای کالیبره کردن شبکه‌های توزیع کلید کوانتومی متغیر- پیوسته مورد استفاده قرار گیرد و همچنین، برای اندازه‌گیری‌های دمای اتم سرد چند حسگری، و اندازه‌گیری فاز تداخلی توزیع یافته کاربرد دارد (شکل ۳) [۸].



شکل ۳: حسگر توزیع کوانتومی برای اندازه‌گیری جابجایی درجه چهار میدان [۸]

۲-۵-۲- مجموعه مرکز خالی از نیتروژن (NV)

اخیرا هیجان زیادی در مورد مجموعه‌های مراکز خالی از نیتروژن (نقص‌های اسپینی الکترونی در الماس که می‌توانند به‌طور نوری آماده‌سازی و خوانده شوند) به‌وجود آمده است. بلورهای الماس با آلایش زیاد، نویدبخش سلول‌های بخار فریزشده‌ی مجموعه‌های اسپین هستند، که ممان مغناطیسی قوی و خوانش نوری کارآمد سلول‌های بخار اتمی را با چگالی‌های بالای اسپین قابل دسترسی در حالت جامد ترکیب می‌کنند. اگرچه کاهش زمان همدوسی، اهمیت این مزایا را تحت تاثیر قرار می‌دهد، اما حساسیت پیش‌بینی‌شده‌ی ژبرسکوپ‌ها (10^{-2} rad/s/√Hz) یا مغناطیس‌سنج‌های الماس ($250 \text{ aT}/\sqrt{\text{Hz}/\text{cm}^{-2/3}}$) با هم‌تایان اتمی آن‌ها، قابل مقایسه خواهد بود. انتقال چنین پتانسیلی به دستگاه‌های واقعی، به دو دلیل فنی، چالش‌برانگیز است.

اول آشکارسازی کارآمد فلورسانس مجموعه‌های بزرگ NV، دشوار است، در حالی که طرح‌های پراکندگی و جذب، به سادگی پیاده‌سازی نمی‌شوند. دوم اینکه، زمان‌های همدوسی اسپین، ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ بار در مجموعه‌های با چگالی بالا کاهش می‌یابند. در نتیجه در حال حاضر، حتی پیشرفته‌ترین دستگاه‌ها با حساسیت چند مرتبه بزرگی بالای حد نظری کار می‌کنند. درحالی‌که حسگری بزرگ مقیاس میدان‌های همگن، یک چالش باقی می‌ماند، مراکز NV در گرادیان میدان مغناطیسی به‌عنوان آنالیزوز طیفی برای سیگنال‌های میکروویو فرکانس بالا در حوزه‌ی تصویربرداری، به‌عنوان پیکسل‌های آشکارساز برای نگاشت ریزبینی میدان‌های مغناطیسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱].

۲-۵-۱- حسگر یکپارچه CMOS بر پایه NV

محققان دانشگاه MIT، برای نخستین‌بار موفق به ساخت حسگر کوانتومی بر پایه الماس روی چیپ سیلیکونی شدند. این پیشرفت، راه را برای ساخت سخت‌افزارهای مقیاس‌پذیر و ارزان قیمت برای

هسته^{۱۷} و همکارانش از ویژگی‌های حسگری ذاتی مراکز خالی از نیتروژن یا به اختصار NV، به منظور توسعه‌ی ابزارهای بهره‌برده‌اند. به این ترتیب که برای ساخت و توسعه‌ی این حسگر کوانتومی، یک لایه‌ی نازک از مراکز خالی از نیتروژن را داخل یک سلول سندان الماس مهندسی کردند، تا از پدیده‌هایی که داخل محفظه‌ی پرفشار این سلول رخ می‌دهند، تصویربرداری کنند.

آن‌ها در ابتدا یک لایه از حسگرهای مرکز خالی از نیتروژن، به ضخامت چند صد اتم را داخل قیراط الماس یک دهمی ایجاد کردند و سپس قابلیت حسگر NV را برای اندازه‌گیری محفظه‌ی پرفشار سلول سندان الماس بررسی کردند. حسگرهای NV نشان دادند، که مرکز سطح مسطح سندان الماس تحت فشار، شروع به خم شدن می‌کند. آن‌ها این پدیده را در فشار ۲۰ برابر فشار فعلی انجام دادند، که در این فشار، خمیدگی با چشم نیز، قابل رویت است. اما این حسگر کوانتومی خمیدگی بسیار کوچک را حتی در کمترین فشار نیز تشخیص می‌دهد. در یک آزمایش دیگر، وقتی مخلوط متانول و اتانول تحت گذار از فاز مایع به فاز جامد قرار گرفت، سطح الماس از یک کاسه‌ی صاف به یک کاسه‌ی ناصاف، دنداندار و بافت‌دار تبدیل شد. این روش، یک روش به‌طور کامل جدید برای اندازه‌گیری تغییر فاز مواد در فشار بالا می‌باشد و می‌تواند مکمل روش‌های سنتی باشد که از تابش قوی ایکس از یک منبع سنکروترون یا شتاب‌دهنده‌ی حلقوی استفاده می‌کنند [۱۰].

۲-۶- اسپین حالت جامد- حسگر تک‌اسپین

خواندن تک‌اسپین‌ها^{۱۸} در حالت جامد (نقطه عطفی در مسیر تحقق کامپیوترهای کوانتومی) با هر دو طرح نوری و الکتریکی، محقق شده است. خوانش الکتریکی با آلاینده‌های فسفر در سیلیکون و نقاط کوانتومی نیمه‌رسانای به‌طور الکتروستاتیکی تعریف شده، ثابت شده است.

خوانش نوری با تک‌مولکول‌های آلی، نقاط کوانتومی فعال نوری و مراکز نقص در مواد بلوری شامل الماس و کاربید سیلیکون و همچنین آشکارسازی مکانیکی تک‌نقص‌های پارامغناطیسی در سیلیکا و رصد بی‌درنگ نوسانات چنداسپینی ثابت شده است. در میان تمام اسپین‌های حالت جامد، مراکز NV در الماس، بیشترین توجه را برای اهداف حسگری به سمت خود جلب کرده‌اند. این امر تا حدودی به دلیل آشکارسازی نوری راحت در دمای اتاق و تا حدودی به دلیل پایداری آن‌ها در بلورهای بسیار کوچک و نانو ساختارهاست [۱].

۲-۶-۱- جای خالی اتم به عنوان بیت کوانتومی

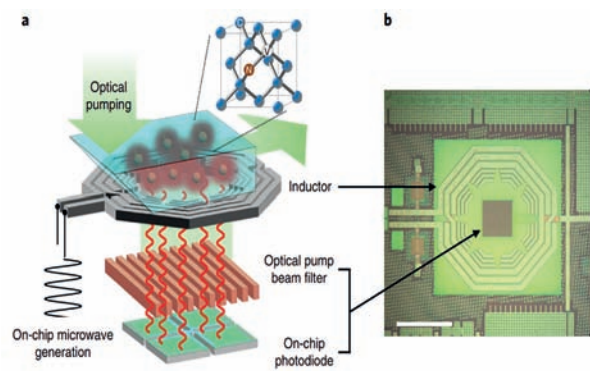
گاتسکل و همکارانش، برای نخستین‌بار موفق به اثبات مراکز اسپین در یک بلور نیتريد بور شده‌اند. این مراکز می‌توانند حتی در دمای اتاق نیز به‌عنوان بیت‌های کوانتومی عمل کنند.

روش کار به این‌صورت بود، که آن‌ها نقص ویژه‌ای (یک اتم بور جافتاده) را در شبکه بلور لایه‌ای نیتريد بور یافتند که یک ممان دوقطبی مغناطیسی نشان می‌دهد، که با عنوان یک اسپین نیز شناخته می‌شود. به علاوه، این نقص می‌تواند نور را جذب و گسیل نماید و از این‌رو مرکز رنگ نیز نامیده می‌شود. به منظور بررسی دقیق خواص مغناطیسی-اپتیکی این گسیل‌کننده‌ی کوانتومی، یک روش تجربی جدیدی معرفی کردند، که در آن از ترکیب یک میدان مغناطیسی ایستا و یک میدان مغناطیسی فرکانس بالا استفاده می‌شود، که اگر فرکانس میدان مغناطیسی متناوب را تغییر دهید، در یک نقطه، به‌طور دقیق به فرکانس اسپین می‌رسید و لومینسانس نوری به شدت تغییر می‌کند. محققان، این مراکز را در سیستم بلوری دوبعدی کشف کرده‌اند که پیش‌تر تنها به صورت نظری پیش‌بینی

محاسبات، حسگری و ارتباطات کوانتومی هموار می‌سازد. مراکز جای خالی نیتروژن (NV)، نقص‌هایی با الکترون هستند که می‌توانند به‌وسیله نور و ماکروویو دستکاری شوند. در پاسخ، آن‌ها فوتون‌های رنگی که حاوی اطلاعات کوانتومی درباره میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی اطراف هستند را منتشر می‌کنند، که می‌تواند برای کاربردهایی از قبیل حسگرهای پزشکی، تصویربرداری عصبی، تشخیص اشیاء و سایر کاربردهای سنجشی استفاده شوند. حسگرهای کوانتومی بر پایه NV سنتی به دلیل بزرگی، گران قیمت بودن و اجزای گسسته، مقیاس پذیری و کارایی محدودی دارند. در این بررسی محققان توانستند تمامی اجزای بزرگ شامل: مولد ماکروویو، فیلتر و آشکارساز نوری را روی یک بسته‌بندی مقیاس میلی‌متر با استفاده از روش‌های سنتی ساخت نیمه‌هادی ادغام کنند (شکل ۴).

مراکز NV در اصل یک اتم با هسته و الکترون‌های اطراف آن هستند که دارای خواص فوتولومینسانس می‌باشند، به این معنی که می‌توانند فوتون‌های رنگی جذب و منتشر کنند. حرکت ماکروویو در اطراف مراکز می‌تواند حالات مثبت، منفی و خنثی را به‌وجود بیاورد که باعث تغییر اسپین الکترون‌های خودش می‌شود. سپس آن تعداد زیادی فوتون قرمز وابسته به اسپین منتشر می‌کند.

تعداد فوتون‌های منتشر شده در تعامل با میدان مغناطیسی اطراف با روش رزونانس مغناطیسی آشکارسازی نوری (ODMR)^{۱۵} اندازه‌گیری می‌شود. این تعامل اطلاعات قابل اندازه‌گیری بیشتری درباره میدان می‌دهد.



شکل ۴: سیستم حسگر کوانتومی یکپارچه CMOS [۹]

مراکز NV در صفحه الماس در منطقه حسگری روی چیپ قرار گرفته‌اند. لیزر پمپی سبب کوچکی مراکز NV را تحریک می‌کند، درحالی‌که یک نانو سیم در نزدیکی مراکز NV قرار گرفته در پاسخ به جریان باعث جابه‌جایی ماکروویو می‌شود. در واقع نور و ماکروویو با هم، باعث انتشار فوتون‌های قرمز می‌شوند.

در زیر مراکز NV، یک دیود نوری برای حذف نویز و اندازه‌گیری فوتون‌ها طراحی شده است. بین الماس و دیود نوری یک توری فلزی به عنوان فیلتر قرار دارد، که فوتون‌های لیزر سبب را جذب می‌کند و به فوتون‌های قرمز اجازه عبور و رسیدن به دیود نوری را می‌دهد. در نهایت دستگاه ODMR تغییرات فرکانس رزونانس فوتون‌های قرمز که حاوی اطلاعاتی درباره محیط هستند را اندازه‌گیری می‌کند [۹].

۲-۵-۲- حسگر فشار و مغناطیس

توسعه‌ی مواد الکترونیکی و نوری جدید با کارایی بالا به اندازه‌گیری چگونگی تغییر ویژگی‌های ماده از قبیل مغناطیس و سختی، تحت شرایط حدی نیاز دارد. سلول‌های سندان الماس^{۱۶} امکان بازتولید چنین شرایطی را در آزمایشگاه فراهم می‌کنند.

شده بود.

آن‌ها توانستند قطبش اسپین، یعنی همسویی ممان مغناطیسی نقص تحت برانگیختگی نوری را حتی در دمای اتاق، ثابت کنند. شناسایی مرکز اسپینی در نیتريد بور، به صورت نوری یا الکتریکی قابل همسوسازی، دستکاری و پیرو آن قابل بازخوانی باشند به واسطه‌ی آن که چنین مرکزی دارای اسپین است و قادر به جذب و گسیل نور نیز می‌باشد، یک بیت کوانتومی است که در حسگری کوانتومی و اطلاعات کوانتومی قابل استفاده می‌باشد، فناوری نوبری جدید نیز می‌تواند با این فناوری کار کند [۱۱].

۲-۶-۲- جفت‌شدگی سیستم‌های کوانتومی دور از هم به وسیله حلقه لیزری

محققان موفق شدند برای نخستین بار، یک جفت‌شدگی قوی میان سیستم‌های کوانتومی دور از یکدیگر ایجاد کنند. در این روش، یک حلقه‌ی لیزر، سیستم‌ها را به یکدیگر متصل کرده و امکان تبادل اطلاعات به‌طور تقریبی بدون اتلاف؛ و برهمکنش قوی میان آن‌ها را فراهم می‌کند. این روش جدید، امکانات زیادی را در فناوری شبکه‌های کوانتومی و همچنین حسگرهای کوانتومی به دست می‌دهد.

گروهی از فیزیک‌دانان، برای نخستین بار موفق به ایجاد جفت‌شدگی کوانتومی قوی میان دو سیستم با فاصله‌ی زیاد و در محیط دمای اتاق شده‌اند. محققان در آزمایش خود، از نور لیزر به منظور جفت کردن ارتعاشات یک پوسته‌ی نازک ۱۰۰ نانومتری با حرکت اسپین اتم‌ها در فاصله‌ی بیش از یک متر استفاده کردند. در نتیجه، هر ارتعاش پوسته، اسپین اتم‌های در حال حرکت را تعیین می‌کند و برعکس.

نور بعد از قرار گرفتن بین دو سیستم و رفت و برگشت، مانند یک فنر مکانیکی که بین اتم‌ها و پوسته، کشیده شده، عمل می‌کند و نیرو را بین آن دو منتقل می‌کند. در این حلقه لیزری، ویژگی‌های نور می‌تواند به گونه‌ای کنترل شود، که هیچ اطلاعاتی راجع به حرکت دو سیستم از دست نرود و وارد محیط نشود. در این صورت تضمین شود که برهمکنش مکانیک کوانتومی مختل نمی‌شود. جفت کردن سیستم‌های کوانتومی با نور، بسیار انعطاف‌پذیر و گسترده است، می‌توان اشعه‌ی لیزر را بین دو سیستم کنترل کرد که تولید انواع مختلفی از برهمکنش‌ها را که به‌عنوان مثال برای حسگرهای کوانتومی مفید هستند، امکان‌پذیر می‌کند [۱۲].

۲-۷- دستگاه‌های تداخلی کوانتومی ابررسانا

دستگاه‌های تداخل کوانتومی ابررسانا یا SQUIDها، یکی از قدیمی‌ترین و در عین حال، حساس‌ترین نوع حسگرهای مغناطیسی‌اند. تداخل سنج‌های رسانای ابررسانا میدان‌های مغناطیسی با حساسیت $10 \text{ aT}/\sqrt{\text{Hz}}$ را اندازه‌گیری می‌کنند.

مکانیزم حسگری آن‌ها بر پایه‌ی فاز بوهم-آهارونو^{۱۹} که بر روی تابع موج ابررسانا به وسیله میدان مغناطیسی احاطه شده تأثیر می‌گذارد و توسط مدار مناسب از اتصالات فاز حساس جوزفسون خوانده می‌شود. SQUIDها برای پردازش سیگنال‌ها از DC تا رنج‌های بالای GHz به کار برده شده‌اند، که حد بالا با فرکانس جوزفسون^{۲۰} تعیین شده است. از دید تجاری، SQUIDها می‌توانند به‌عنوان پیشرفته‌ترین نوع حسگر کوانتومی و با کاربردهایی از تشخیص مواد در فیزیک حالت جامد گرفته تا سیستم‌های مگنتوانسفالوگرافی بالینی برای اندازه‌گیری میدان‌های کوچک سرگردان جریان‌های الکتریکی در مغز، به شمار آیند. همزمان با توسعه دستگاه‌های SQUID ریزبینی، کوچک‌سازی منجر به تولد SQUIDهای نانو در زیر مقیاس میکرون و با کاربردهای ممکن در تصویربرداری گرمایی، جریان و مغناطیسی شده است. از آنجایی که SQUIDها به جای همدوسی زمانی به همدوسی فضایی

متکی هستند، با تداخل سنج‌های نوری، ارتباط نزدیک‌تری دارند تا حسگرهای اسپینی [۱].

۲-۸- کیوبیت‌های ذرات بنیادی

ذرات بنیادی خیلی قبل‌تر از توسعه‌ی کیوبیت‌های حالت جامد و اتمی، به‌عنوان حسگرهای کوانتومی به کار گرفته شده‌اند. این حقیقت به نوعی متناقض، به دلیل آماده‌سازی و خوانش سرراست و همچنین قرارگیری هدفمند آن‌ها در نمونه‌های مربوطه است.

۲-۸-۱- فونون‌ها

طبق قوانین کوانتومی وقتی جسمی ارتعاش می‌کند، ارتعاش‌ها نه تنها باید به شکل موج، بلکه باید به شکل ذرات هم رفتار کنند، یعنی واحدهای منفرد انرژی که به‌عنوان فونون‌ها شناخته می‌شوند، ارتعاش کنند. دانشمندان برای نخستین بار توانستند یک تک فونون را در ماده‌ی معمولی در دمای اتاق، ساخته و اندازه‌گیری کنند. فونون‌ها یا ذرات منفرد ارتعاش که با مکانیک کوانتومی توصیف می‌شوند، با گرما همراه‌اند.

پژوهشگران، برای اینکه بفهمند فوتون می‌تواند با یک فونون منفرد برهمکنش کند، پالسی از فوتون‌ها را به درون ماده شلیک می‌کردند. وقتی این اتفاق می‌افتد، فوتون در فرآیندی که پراکندگی رامان نامیده می‌شود، باید در یک انرژی متفاوت با آنچه از طریق برهمکنش با فونون به آن منتقل شده، به بیرون پرتاب شود. به این ترتیب، آن‌ها می‌توانستند فونون‌های منفرد را در دمای مافوق سرد و مواد به دقت مهندسی شده، آشکار کنند.

در این پروژه، الماس مورد آزمایش گرفت. در الماس، فونون‌ها به‌صورت طبیعی در فرکانس‌های بالا، یعنی در ده‌ها تراهرتز عمل می‌کنند. این فرکانس‌ها آنقدر بالاست که در دمای اتاق، انرژی تک فونون از انرژی گرمایی محیط بالاتر است. وقتی این بلور الماس در دمای اتاق قرار می‌گیرد، حرکت فونون حتی وجود ندارد، زیرا در دمای اتاق، انرژی لازم برای برانگیختن هیچ چیزی وجود ندارد.

بنابراین آن‌ها سعی کردند تا درون این مخلوط فونون‌ها (که به لحاظ ارتعاشی، یک مخلوط آرام است)، تنها یک فونون را برانگیخته کنند. آن‌ها پالس‌های لیزر با فرکانس بالا، شامل ۱۰۰ میلیون فوتون در هر پالس را به درون الماس فرستادند. در چنین موقعیتی، شانس این وجود داشت که یکی از آن‌ها بر همکنش کرده و یک فونون بازتاب کند، سپس فرکانس کاهش یافته‌ی فوتون شرکت‌کننده در برخورد را اندازه‌گیری کردند، که در واقع تایید می‌کرد، آن به درستی به یک فونون برخورد کرده است. اما آن‌ها به کمک این کار نمی‌توانستند تشخیص دهند چند فونون در این فرآیند برانگیخته شده است.

آن‌ها برای کشف تعداد فونون‌های برانگیخته شده، پالس دوم لیزر را به درون الماس فرستادند. برای هر فونون برانگیخته شده به وسیله‌ی پالس اول، این پالس دوم می‌تواند فونون برانگیخته شده را به آسایش برساند (از حالت برانگیخته به حالت با انرژی کمتر برود) و انرژی را به‌صورت یک فوتون جدید پراکنش دفع کند. اگر در ابتدا فقط یک فونون برانگیخته شده بود، سپس یک فوتون جدید با فرکانس بالا باید ساخته می‌شد. برای تایید این عمل، یک شیشه‌ی نیمه شفاف را در مسیر خروج فوتون پراکنش قرار گرفت و دو آشکارساز در هر طرف شیشه قرار داده شد. فوتون‌ها شکافته نمی‌شوند، پس اگر چند فونون، برانگیخته و سپس آسایش یابند، فوتون‌های حاصل باید از میان شیشه عبور کنند و به‌صورت تصادفی در هر دو آشکارساز پراکنده شوند.

اگر فقط یک آشکارساز سیگنال بدهد، که به معنای آشکار شدن یک تک فوتون است، آنگاه با اطمینان می‌توان گفت که آن فوتون با یک

تک فوتون بر همکنش کرده است. در پایان توانستند یک تک کوانتوم از ارتعاش را ساخته و آشکار کنند [۱۳].

۲-۸-۲- نوترون‌ها

پژوهشگران موسسه پائول شرر (PSI)، خاصیتی از نوترون را بسیار دقیق‌تر از گذشته اندازه‌گیری کرده‌اند. آن‌ها در این فرآیند دریافتند که این ذره، یک ممان دوقطبی الکتریکی بسیار کوچک‌تر از آنچه پیش از این فرض می‌شد، دارد.

انفجار بزرگ، هم ماده و هم پادماده را در عالم ایجاد نمود، اما از آنجا که این دو یکدیگر را نابود می‌کنند، باید ماده‌ای اضافی وجود داشته باشد که تا به امروز باقی‌مانده است. دلیل این مقدار مازاد ماده، یکی از بزرگ‌ترین معماهای فیزیک و نجوم است. پژوهشگران امیدوارند به کمک نوترون‌ها که اجزای بدون بار سازنده اتم‌ها هستند، سرنخی برای این پدیده بنیادی پیدا کنند. فرضیه این است: اگر نوترون یک ممان دوقطبی الکتریکی به اختصار (nEDM) با یک مقدار غیر صفر قابل اندازه‌گیری داشته باشد، این حقیقت می‌تواند ناشی از همان اصل فیزیکی باشد که مقدار اضافی ماده را پس انفجار بزرگ توضیح می‌دهد.

مدت‌هاست که معلوم شده نوترون یک قطب‌نمای مغناطیسی است و با یک میدان مغناطیسی برهمکنش می‌کند یا به اصطلاح تخصصی: دارای یک ممان دوقطبی مغناطیسی است. به علاوه اگر نوترون دارای یک ممان دوقطبی الکتریکی نیز باشد، مقدار آن بسیار کمتر از ممان دوقطبی مغناطیسی آن است و بنابراین اندازه‌گیری آن، بسیار سخت‌تر است. بنابراین محققان PSI مجبور بودند مسافت‌های بزرگی را انتخاب کنند تا میدان مغناطیسی محلی را در طول اندازه‌گیری، کاملاً ثابت نگه دارند.

همچنین لازم بود شمار نوترون‌های مشاهده شده، به اندازه‌ی کافی زیاد باشد تا شانس اندازه‌گیری nEDM^{۱۱} فراهم شود که نوترون‌های به اصطلاح مافوق سرد، یعنی نوترون‌هایی با حرکت نسبتاً آهسته، اندازه‌گیری شدند. هر ۳۰۰ ثانیه، یک دسته‌ی با طول عمر ۸ ثانیه با بیش از ۱۰ هزار نوترون به محل آزمایش هدایت و بررسی شدند. پژوهشگران در مجموع ۵۰ هزار از این دسته‌ها را اندازه‌گیری نمودند. محققان داده‌های اندازه‌گیری را در طی ۲ سال جمع‌آوری نموده‌اند، آن‌ها را در دو گروه به دقت ارزیابی کرده‌اند و این گونه نتیجه‌ای دقیق‌تر از گذشته به دست آورده‌اند. نتیجه‌ی کنونی آن‌ها مقداری برای nEDM بدست می‌دهد، که برای اندازه‌گیری توسط ابزارهای کنونی، بسیار کوچک است؛ مقداری که بسیار به صفر نزدیک است. در نتیجه این یافته، احتمال اینکه نوترون به توضیح مقدار اضافی ماده کمک کند را کم می‌نماید، اما این فرض را به طور کامل کنار نمی‌گذارد [۱۴].

۲-۹-۲- حسگرهای اپتیکی

۲-۹-۱- حسگرهای آشکارسازی نانوذرات

یکی از کاربردهای اساسی علم نورشناسی، حسگر اپتیکی است. حسگرهای اپتیکی در زمینه‌ی علم نجوم، محیط‌زیست، صنعت و تشخیص‌های پزشکی، نقش اساسی دارند.

تلاش‌های جدید بر نوع خاصی از دستگاه‌های به دام‌انداز نور، به نام تشدیدکننده‌های ریزحلقه^{۲۲} تمرکز دارند؛ این دستگاه‌ها برهمکنش بین نور و مولکول را برای آشکارسازی، افزایش می‌دهند. با این حال، فیزیک بنیادی این دستگاه‌ها، حساسیت آن‌ها را محدود می‌کند. ژانگ^{۲۳} و همکارانش، یک نوع حسگر جدید پیشنهاد دادند، که این نوع حسگرهای ریزحلقه‌ی پیشرفته، مبتنی بر مفهوم اصلی سطوح استثنایی هستند، که از نقاط استثنایی تشکیل شده‌اند. یک سیستم

فیزیکی که یک نقطه استثنایی را نشان می‌دهد، بسیار شکننده است. به عبارت دیگر، هر گونه اختلال کوچکی، رفتار آن را به طور چشمگیری تغییر خواهد داد. این ویژگی، سیستم را به سیگنال‌های کوچک، بسیار حساس می‌کند. این دستگاه‌ها نسبت به خطاهای اجتناب‌ناپذیر هنگام ساخت و تغییرات ناخواسته محیطی، بسیار حساس هستند. در نمونه‌های آزمایشگاهی پیشین، حساسیت حسگرهای اپتیکی مستلزم استفاده از ترفندهای هوشمندانه‌ای بود. در حالی که محققان به بهبود طراحی حسگرهای ریزحلقه ادامه می‌دهند، امیدوارند مشاهدات به‌ظاهر کوچک اپتیکی از طریق بهبود این دستگاه‌ها، اثرات قابل توجهی داشته باشند [۱۵].

۲-۹-۲- حسگر یونی آشکارساز فوتون

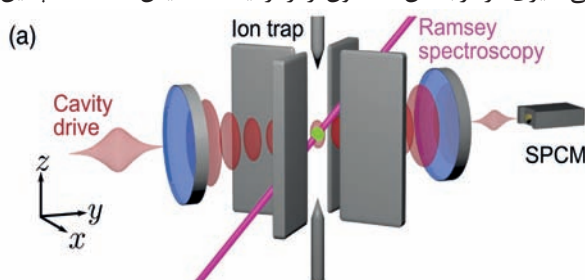
زمانی که یک آشکارساز فوتون، موج ورودی نور را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند، خود فوتون از بین می‌رود. لی^{۲۴} و همکارانش توانستند نور را از طریق یک حسگر کوانتومی به‌طور غیرمخرب اندازه‌گیری کنند. این کشف امکان مطالعه‌ی ویژگی‌های کوانتومی نور را نیز ممکن می‌سازد. این پروژه شامل ایجاد واسطه‌هایی است، که امکان انتقال اطلاعات کوانتومی را از ماده به نور و بالعکس فراهم می‌سازند. در این تحقیق اتم کلسیم یونیزه شده به‌عنوان حسگر کوانتومی برای استخراج اطلاعات فوتون‌های حفره‌ای بدون تخریب آن‌ها در نظر گرفته شده است. به این ترتیب که این یون بین دو آیینه توخالی قرار داده شده تا نور لیزر مرئی را هدایت کند. این یون تأثیر ضعیفی روی نور دارد.

از طریق طیف‌سنجی رمزی^{۲۵} از یون‌ها تغییر فاز و کاهش میزان حالات یون که هر دو ناشی از تعامل یون با میدان حفره است اندازه‌گیری می‌شود. تغییر فاز متوسط با میانگین تعداد فوتون حفره به دلیل اثر استارک متناسب است. فوتون‌های خروجی از سوراخ توسط ماژول شمارش تک فوتون (SPCM)^{۲۶} شمارش می‌شوند (شکل ۵).

بازسازی توزیع عدد فوتون حفره‌ای از این اندازه‌گیری‌ها امکان تعیین میانگین و عرض توزیع را می‌دهد، بدین ترتیب می‌توان بین حالات با آمار فوتون منسجم و آمار مخلوط حرارتی مختلف تفاوت قائل شد. اندازه‌گیری‌های کوانتومی این یون این امکان را می‌دهد در مورد تعداد ذرات نور داخل محفظه، پیش‌بینی‌هایی انجام شود، که نتیجه‌ی این پژوهش یک حسگر کوانتومی برای ذرات نور شناخته می‌شود. یکی از کاربردهای این روش جدید می‌تواند تولید میدان‌های نوری با طراحی ویژه باشد [۱۶].

۲-۹-۳- حسگرهای مبتنی بر نانوسیم

حسگرهای کوانتومی مبتنی بر نانوسیم‌های نیمه‌هادی، می‌توانند ذرات تک نور را با وضوح، سرعت و کارایی بالا در محدوده طول موجی بی‌ظیری، از فرابنفش تا مادون قرمز نزدیک تشخیص دهند. همچنین



شکل ۵: تجهیزات آزمایش: تک یون به دام افتاده بین دو آیینه که به وسیله نور لیزر هدایت می‌شود. به وسیله طیف‌سنجی رمزی تغییر فاز اندازه‌گیری شده و توسط شمارش‌گر تعداد فوتون خروجی شمرده می‌شود [۱۶].

این فن آوری به طور قابل توجهی توانایی بهبود ارتباطات کوانتومی و قابلیت سنجش از راه دور را دارا می باشد. این حسگر برای تشخیص نور بسیار کارآمد خواهد بود و در کاربردهایی مانند رادار کوانتومی، نظارت و عملیات شبانه، که تعداد کمی از ذرات نور به دستگاه باز می گردند، شما را قادر می سازد هر تک فوتون که وارد می شود را شناسایی نمایید.

گیبسون^{۲۷} و همکارانش، آرایه ای از نانوسیم های مخروطی ایجاد کردند که فوتون های ورودی را به جریان الکتریکی تبدیل می کنند که می توان آن را تقویت و شناسایی نمود. در این دستگاه از نانوسیم های ایندیم فسفید (InP) استفاده می شود. برای مثال تغییر مواد به ایندیم گالیم آرسنیک (InGaAs) می تواند پهنای باند را با حفظ عملکرد به سمت طول موج های مخابراتی گسترش دهد. با توجه به کیفیت مواد، تعداد نانوسیم ها، بهینه سازی شکل و ترتیب نانوسیم ها، آرایه نانوسیم نیمه هادی با سرعت، تفکیک پذیری زمانی و کارایی زیاد به دست می آید. این حسگر در حالی که در دمای اتاق عمل می کند، می تواند طیف گسترده ای از نور را با بازده زیاد و تفکیک پذیری زمانی بالا تشخیص دهد. حتی می توان طیف جذبی را نیز با مواد مختلف گسترش داد.

سنجش از راه دور، تصویربرداری با سرعت بالا از فضا، دستیابی به تصاویر سه بعدی با وضوح زیاد، ارتباطات کوانتومی و تشخیص اکسیژن تک برای پایش مقدار دارو در درمان سرطان، همه از جمله کاربردهای آشکارسازی قوی تک فوتونی است که این حسگر کوانتومی جدید می تواند فراهم نماید [۱۷].

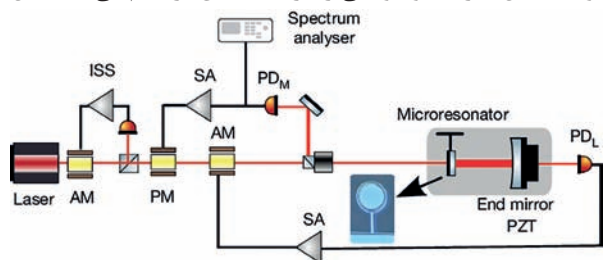
۲-۹-۴- بهبود حساسیت آشکارساز امواج گرانشی

مکانیک کوانتومی، به دلیل اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، محدودیتی بنیادی در دقت اندازه گیری های پیوسته ایجاد می کند و به عبارتی عمل برگشتی باعث افزایش عدم قطعیت در متغیرهای مزدوج می شود. ابزارهای آشکارسازی امواج گرانشی، تداخل سنج ها هستند، که از نور لیزر برای مقایسه تفاوت تغییر طول دو بازوی عمود برهم خود هنگام عبور امواج گرانشی استفاده می کنند.

نویز کوانتومی حدی است که مکانیک کوانتومی در اندازه گیری مکان ایجاد می کند و شامل نویز شمارش فوتون و نویز فشار تابشی است. به تازگی توماس کوربیت و تیم تحقیقاتی او، برای اولین بار موفق به اندازه گیری بدون تشدید نویز فشار تابش کوانتومی در باند صوتی و در فرکانس های مربوط به آشکارسازهای امواج گرانشی شده اند.

نتایج این پژوهش می تواند به توسعه ی روش هایی برای بهبود حساسیت آشکارسازهای امواج گرانشی از طریق ساخت و توسعه ی تکنیک هایی برای افزایش بی دقتی ها در اندازه گیری که به آن عمل برگشتی^{۲۸} گفته می شود، کمک کند، بدین ترتیب احتمال آشکارسازی امواج گرانشی افزایش می یابد.

محققان دستگاه هایی فیزیکی اختراع کرده اند که امکان مشاهده (و شنیدن) اثرات کوانتومی را در دمای اتاق فراهم می کنند. این



شکل ۶: شماتیکی از تجهیزات آزمایش [۱۸]

دستگاه ها، شامل مدل های مینیاتوری آشکارسازهایی مانند لیگو یا تداخل سنج لیزری امواج گرانشی است. یک پرتو لیزر به سمت یکی از این آینه های معلق، هدایت شده و زمانی که این پرتو منعکس می شود، فشار تابش افت و خیزی آن برای خم کردن ساختار پایه ای آن، به اندازه ای است که باعث ارتعاش لایه ی آینه ای آن و سپس موجب ایجاد نویز شود (شکل ۶) [۱۸].

۲-۹-۵- الگوریتم اندازه گیری نوری چند پرتویی

به پیشینه رساندن حساسیت ابزارهای اندازه گیری برای تمام حوزه های علم و فناوری، بسیار مهم است. فناوری کوانتومی راه حلی را در این زمینه ارائه داده که دقت را تا حد بنیادی هایزنبرگ افزایش می دهد و در این راه، از اصول اساسی مکانیک کوانتومی بهره می برد. محققان در این پژوهش تازه، سنجش کوانتومی را با اپتیک خطی تلفیق کردند. آن ها طرح اپتیکی را ارائه دادند، که روش تخمین فاز مبتنی بر تبدیل فوریه را اجرا می کند. این روش در قلب بسیاری از الگوریتم های کوانتومی، از جمله پروتکل های اندازه گیری با دقت بالا قرار دارد. آرایش خاص تعداد بسیار زیادی از عناصر نوری خطی، کسب اطلاعات در مورد زوایای هندسی، موقعیت، سرعت و همچنین پارامترهای دیگر اشیای فیزیکی را ممکن می سازد. اندازه گیری شامل کدگذاری کمیت دلخواه در فازهای اپتیکی است که پس از آن مستقیماً تعیین می شوند. این پژوهش نشان داد که اپتیک خطی، یک بستر مقرون به صرفه و مؤثر برای اجرای اندازه گیری ها و محاسبات کوانتومی در مقیاس متوسط است [۱۹].

۲-۹-۶- توسعه تداخل سنج نوری دقیق

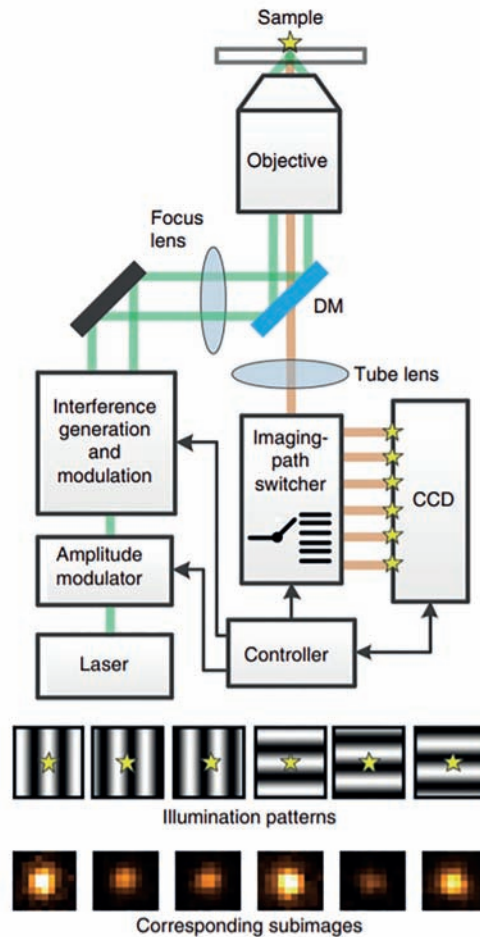
یک تداخل سنج اتمی، نیروها و انرژی های بسیار کوچک را اندازه گیری می کند. برای این منظور، در ابتدا باریکه ای از اتم ها را به دوشاخه جدا می کند و سپس به منظور شکل دهی یک الگوی تداخلی، آن ها را باز ترکیب می کند. این الگو، هنگامی تغییر می کند که یک نیرو به صورت متفاوت روی دوشاخه اتمی عمل می کند. محققان قبل از باز ترکیب دوشاخه می توانند دقت یک تداخل سنج را با شتاب دادن اتم های یک شاخه نسبت به شاخه دیگر افزایش دهند. به هر حال، در عمل، فوتون های استفاده شده جهت شتاب دادن اتم ها، عدم قطعیتی به فاز اتم ها وارد می کند که در عوض، دقت تداخل سنج را کاهش می دهد. محققان، روشی برای انتقال مؤثر تکانه فوتونی به اتم ها ثابت کردند که این عدم قطعیت را کمینه می کند.

این گروه در آزمایش های خود، اتم های ایتربیم را در یک شبکه نوری که توسط تابش دو لیزر سبب به اتم ها ایجاد شده بود، نگه داشتند. آن ها در حالی که به طور همزمان فرکانس لیزرهای به دام اندازی را تغییر می دادند، اتم ها را درون شبکه نوری نگه داشتند. این کار موجب می شود تا فوتون ها تکانه خود را به اتم ها انتقال دهند. محققان با تکرار این فرآیند توانستند به هر اتم، به اندازه تکانه چهل فوتون انتقال دهند. آن ها دریافتند که وقتی دامنه امواج ایستا در عمق به اصطلاح جادویی باشد، در اثر انتقال تکانه فوتون ها به اتم ها، فاز اتم ها تغییر نمی کند. شرط عمق جادویی فقط هنگامی وجود داشت که دو لیزر به دام اندازی با اعمال فرکانسی خاص، در یک شدت و انحراف مشخص از یکدیگر تنظیم شده بودند. محققان می گویند که طراحی تداخل سنجی خاص آن ها می تواند اندازه گیری ثابت های ساختار ظریف (آزمونی برای نظریه الکترو دینامیک کوانتومی) را حدود شانزده برابر بهبود ببخشد [۲۰].

۲-۹-۷- تصویربرداری با وضوح مولکولی

دانشمندان به تازگی، یک روش تداخل سنجی جایگزینی تک مولکولی برای ریزنگاری فلورسانسی با وضوح بالا توسعه داده اند، که می تواند

دقت جایگزینی را در مقایسه با روش‌های متعارف برازش مرکزوار به‌طور چشمگیری بهبود بخشید. این روش جدید، به اختصار ROSE^{۲۹} نامیده می‌شود. فناوری ROSE برای برانگیختگی مولکول‌های فلوروسنت، از حاشیه‌های تداخل فاز و شش جهت مختلف استفاده می‌کند. این سیستم، مکان یک مولکول فلوروسانس را از طریق شدت الگوهای برانگیختگی مربوط به یک حاشیه تداخلی تعیین می‌کند. (شکل ۷)



شکل ۷: اساس کار ROSE یک پرتو لیزر تحریک شده به دو بخش تقسیم می‌شود تا یک حاشیه تداخل در صفحه نمونه ایجاد شود. شدت و فاز حاشیه تداخلی مدوله شده تا به الگوهای مختلف نورپردازی در طول تصویربرداری تغییر یابد. در مسیر تصویربرداری سیگنال فلوروسنت به نواحی مختلف دستگاه جفت‌شدگی بار (CCD) تغییر می‌یابد و با الگوی نورپردازی همگام می‌شود. بنابراین ۶ تصویر پایین یک زمان نوردهی بدست می‌آیند. [۲۱]

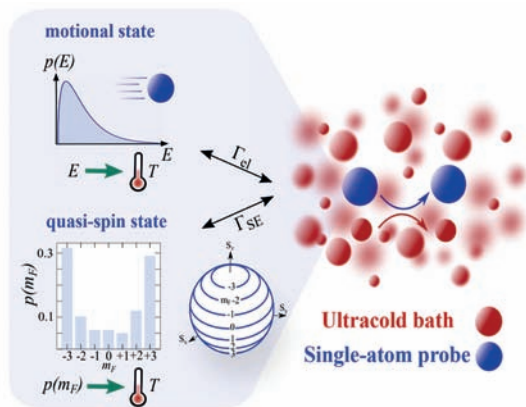
مقیاس مولکولی افزایش دهد. محققان همچنین از فناوری ROSE برای تحلیل نانوساختارهای سلولی استفاده کردند [۲۱].

۲-۱۰-۱- کاوشگر کوانتومی تک اتمی

دما یکی از کمیت‌های فیزیکی است که به‌طور گسترده مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. در این آزمایش، دمای گاز فوق سرد روبیدیم (Rb) را با استفاده از حالات کوانتیده اسپینی یک اتم سزیم (Cs) غوطه‌ور در گاز، به‌طور دقیق اندازه‌گیری کرده‌اند.

بوتون^{۳۱} و همکاری‌اش، برای دستیابی به این هدف، از یک کاوشگر (یک سیستم فیزیکی دیگر که وابستگی دما و خواص فیزیکی آن درک شده) استفاده می‌کنند. اگر کاوشگر به مدت زمان کافی با سیستم در تماس باشد، آنگاه یک تبادل انرژی اتفاق خواهد افتاد که این امر باعث به تعادل رسیدن کاوشگر با دمای سیستم خواهد شد. این تعادل، امکان استنتاج دمای سیستم را از طریق تغییر همزمان برخی از خواص کالیبره شده کاوشگر، مانند ارتفاع ستون مایع در یک لوله باریک، مقاومت الکتریکی یک عنصر رسانا و یا ضریب شکست در یک محیط، فراهم می‌کند. هدف نهایی دماسنجی، کوچک کردن دماسنج‌ها به منظور اندازه‌گیری دماهای دور از دسترس سیستم‌های بسیار کوچک و سرد می‌باشد.

سیستم تجربی، یک ابر به دام افتاده متشکل از حدود ده هزار اتم روبیدیم است. اتم‌ها تا دماهای بین ۲۰۰ تا هزار نانوکلوین، جایی که رفتار گاز، کلاسیکی است، سرد شدند. دمای چنین گازی با اندازه‌گیری‌های زمان‌گریز و از طریق پردازش توزیع سرعت اتم‌ها در ابر، به دقت قابل اندازه‌گیری است. بنابراین این سیستم به‌عنوان یک بستر آزمونی قابل سنجش برای یک دماسنج فوق سرد عمل می‌کند (شکل ۸).



شکل ۸: کاوش کوانتومی تک اتمی یک گاز فوق سرد [۲۲]

محققان به منظور استفاده از اتم‌های سزیم برای تعیین دمای ابر روبیدیم، از برخوردهای تبادل اسپین استفاده کردند که در آن، کوانتاهای تکانه زاویه‌ای بین اتم‌های روبیدیم و سزیم مبادله می‌شود. در یک نوع از برخورد، موسوم به برخورد گرماگیر، اتم روبیدیم به یک حالت انرژی بالاتر و اتم سزیم به یک حالت انرژی پایین‌تر منتقل می‌شود. این فرایند به اندازه $\Delta E/2$ انرژی اضافه نیاز دارد که با حرکت اتم‌های روبیدیم تامین می‌شود. وقوع این برخوردها به در دسترس بودن انرژی جنبشی و در نتیجه دمای ابر روبیدیم بستگی دارد. گسترش توزیع جمعیت حالت اسپینی اتم‌های سزیم ناشی از این برخوردها، اطلاعات دمای گاز را رمزگذاری می‌کند. بنابراین، این نتیجه قاطع، نشان می‌دهد که دماسنجی می‌تواند با استفاده از یک

محققان برای تایید عملکرد فناوری ROSE، سه توری شبکه‌ای مختلف از ساختارهای اوربگامی DNA با نقاط شبکه‌ای به فاصله‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ نانومتری طراحی کردند. درحالی‌که هر دو فناوری متعارف برازش مرکزوار و روش ROSE قادر به بررسی ساختار ۲۰ نانومتری با مقدار فوتون یکسانی هستند، فناوری ROSE می‌تواند به تنهایی، ساختاری با فاصله شبکه‌ای ۱۰ نانومتری را نیز بررسی کند. آن‌ها نشان دادند که فناوری ROSE می‌تواند یک ساختار ۵ نانومتری با وضوح حدود ۳ نانومتر در یک میدان دید بسیار بزرگ، حدود ۲۵ در ۲۵ میکرومتر مربع، را بررسی کند. این نتایج نشان می‌دهد که فناوری ROSE می‌تواند قدرت ریزنگاری جایگزینی تک‌مولکولی (SMLM)^{۳۰} را به

کاووشگر کوانتومی تک‌اتمی و بدون نیاز به پردازش دقیق مدل، انجام شود. آن‌ها توانستند دمای سیستم را تنها پس از ۳۵۰ میلی ثانیه از برهمکنش استخراج کنند [۲۲].

۲-۱۰-۲- دماسنجی در چگال بوز-اینشتین

مهبودی^{۳۲} و همکارانش توانستند دماسنجی طراحی کنند که دما را تا یک نانو کلویین در یک چگال بوز-اینشتین اندازه‌گیری کنند بدون اینکه نمونه تخریب شود، این دماسنج در حقیقت تحلیلی از حالت کوانتومی ناخالصی است که با چگال بوز-اینشتین (BEC)^{۳۳} تعامل داشته است. ایده این آزمایش براساس مدل بوز-پولارون است، به این ترتیب که هنگامی که ناخالصی وارد BEC می‌شود با آن برهمکنش می‌کند، در نتیجه این برهمکنش ناخالصی، اطلاعاتی از BEC بدست می‌دهد، زیرا بسته به خصوصیات آن حالت کوانتومی ناخالصی تغییر می‌کند.

سرانجام با اندازه‌گیری ناخالصی می‌توان اطلاعاتی از خصوصیات BEC مثل دما را فاش نمود و از آنجا که ذره ناخالصی نسبت به BEC کوچک است، اندازه‌گیری آن BEC را تخریب نمی‌کند. از محدودیت‌های این سیستم اندازه‌گیری این است که، مبنای نظری این سیستم اندازه‌گیری دما، تحت شرایط خاصی صحیح است. به طور خاص برابری مدل بوز-پولارون با مدل حرکت براونی تنها در شرایطی که ذره ناخالصی، افت و خیزهای کوچک دارد برقرار است. این بدین معناست که ذره ناخالصی محدود به حرکت در همسایگی خیلی نزدیک مرکز دام است. علاوه بر این، دمای گاز باید کمتر از مقداری خاص باشد تا بتوان از تقریب BEC استفاده کرد [۲۳].

۲-۱۰-۳- توسعه تابش سنج با کمترین میزان نویز

محققان یک تابش سنج (بولومتر) فوق حساس، یک نوع آشکارساز تابش حرارتی ساخته‌اند. این آشکارساز تابشی جدید که از ترکیب پالادیم و طلا ساخته شده است، اندازه‌گیری قدرت تابش الکترومغناطیسی را آسان‌تر می‌کند. این آشکارساز تابشی جدید بسیار حساس است و میزان نویز آن (میزان تغییر یک سیگنال حول مقدار صحیح) تنها یک‌دهم شدت نویز سایر تابش‌سنج‌هاست. این تابش سنج همچنین صد برابر از آشکارسازهای پیشین تابشی کم نویز، سریع‌تر است.

اساس کار یک تابش‌سنج، اندازه‌گیری اثر گرمایی تابش است. وقتی یک تابش‌سنج، گرم می‌شود، مشخصات الکتریکی آن تغییر می‌کند که می‌تواند با دقت بالا اندازه‌گیری شود. هرچه تابش سنج کوچک‌تر باشد، برای گرم کردن آن به تابش کمتری نیاز است. از آنجا که نانو بولومترها حساسیت بسیار بالایی دارند، می‌توانند به راحتی سطح تابش اضافی در کرایوستات را اندازه‌گیری کنند تا تابش را از طریق محافظت بهتر کاهش دهند. می‌توان از تابش سنج برای خواندن مقدار بیت‌های کوانتومی یا کیوبیت‌ها نیز استفاده کرد. اما بدین منظور، لازم است سرعت عملکرد بولومتر، بیشتر شود. در این پژوهش، تقویت‌کننده‌های ریزموج نیز توسعه یافتند. وظیفه آن‌ها تقویت سیگنال است؛ اما آن‌ها باعث اضافه شدن نویز نیز می‌شوند. تقویت‌کننده ریزموج ابررسانا که توسط محققان توسعه پیدا کرده، برای کاهش نویز تابش سنج در مقایسه با بهترین تقویت‌کننده تجاری، موفق بوده است [۲۴].

کلیه آزمایشات انجام شده در زمینه حسگرهای کوانتومی در جدول (۱) نشان داده شده است.

۳- کاربردهای حسگر کوانتومی

در این بخش به برخی از کاربردهای حسگرهای کوانتومی و نحوه استفاده از آن‌ها در زندگی امروزی پرداخته می‌شود.

۳-۱- نقشه‌برداری زیر زمین

دانشمندان زیادی که در حال کار بر روی حسگرهای کوانتومی هستند، کمپانی‌های زیادی را برای تجاری کردن فناوری خود تاسیس نموده‌اند، اما تعداد کمی از آن‌ها، محصولاتی واقعی در بازار دارند. یکی از این کمپانی‌ها، موکوانس^{۳۴} در فرانسه است.

دانشمندان روی گرانش‌سنج‌های ساخته‌شده از تداخل‌سنج‌های اتم که از ویژگی کوانتومی دوگانگی موج-ذره بهره می‌برند، تمرکز کرده‌اند. گرانش‌سنج‌ها به دانشمندان اجازه می‌دهند تا با ثبت افت و خیزهای گرانشی زمان و فضا، تغییرات چگالی را در زیر زمین نقشه‌برداری کنند. گرانش‌سنج کوانتومی موکوانس برخلاف هم‌ارز کلاسیکی‌اش، به نگهداری کم نیاز داشته یا هرگز به نگهداری نیاز ندارد و بنابراین می‌تواند مانند یک گرانش‌سنج نسبی و بدون تغییر نتایج، به‌طور مداوم کار کند. این دستگاه از استوانه‌ای با ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر و یک جعبه‌ی بزرگ‌تر برای لیزرها و صنایع الکترونیکی تشکیل شده، از دستگاه‌های کوانتومی قبلی، کوچکتر بوده و غیرمخصصان نیز می‌توانند با آن کار کنند.

بانگز^{۳۵} و همکارانش در دانشگاه بیرمنگام در حال ساخت یک نوع حسگر گرانشی برای بازار خاص مهندسی معدن هستند. این شیب‌سنج گرانش، از دو ابر اتمی تحت تاثیر همان ارتعاشات خارجی اما در ارتفاعات متفاوتی استفاده می‌کند. کم کردن سیگنال یک ابر از سیگنال ابر دیگر، نویز را حذف می‌کند و گرادبان گرانش را بدست می‌دهد. اگرچه این دستگاه، لزوماً به گرانش، نسبت به جرم‌های روی یک فنر، حساس‌تر نخواهد بود، اما باید بسیار سریع‌تر عمل کند. این اندازه‌گیری‌های سریع‌تر می‌تواند زمان پیمایش را تا ۹۹٪ کاهش داده و در نتیجه هزینه‌های عملیاتی را به شدت کم کند. همچنین این افزایش سرعت می‌تواند بازار جهانی پیمایش گرانش در مهندسی معدن را از ۱۰ تا ۲۰ میلیون دلار کنونی به چندصد میلیون در سال تبدیل کند [۱].

۳-۲- نورهای الماسی

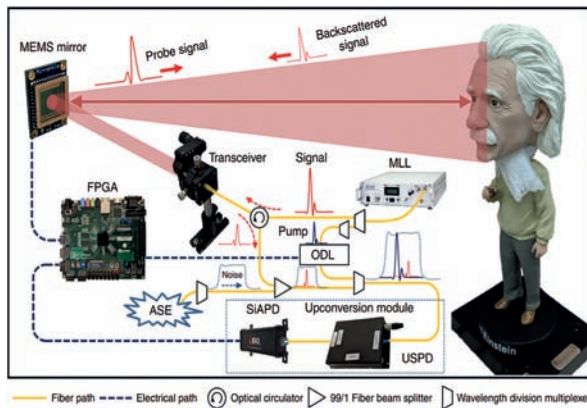
مراکز NV وقتی با نور سبیز برانگیخته شوند، می‌توانند نور قرمز را تابش کنند، اما احتمال رخداد چنین پدیده‌ای، به حالات اسپینی الکترون‌های آن‌ها بستگی دارد. با فرار دادن حالات اسپینی در یک برهم نهی، فقط ریزموج‌های با فرکانس مناسب می‌توانند شدت تابش را تغییر دهند. مهم‌تر از همه، این حالت کوانتومی به لطف شبکه سخت الماس که مراکز NV را از ارتعاشات می‌پوشاند، می‌تواند بیشتر از یک میلی‌ثانیه در دمای اتاق دوام بیاورد.

چند شرکت استارت‌آپی به دنبال تجاری‌سازی فناوری NV در حوزه‌هایی مانند بیوپزشکی هستند. شرکت بوش، غول آلمانی مهندسی نیز در حال ساخت یک نمونه اولیه حسگر NV برای رصد شارژ کردن و پیشگیری از تجاوز جریان در باتری‌های خودرو است. همچنین شرکت الکترونیکی فرانسوی تالس^{۳۶}، به دنبال اعمال گرادبان‌های میدان‌های مغناطیسی در طول بلورهای الماس NV است تا اجزای فرکانس را در طیف‌های ریزموج نامعلوم شناسایی کند. طبق اظهارات مدیر گروه فیزیک کوانتومی شرکت تالس، اپراتورهای شبکه G5 می‌توانند از این فناوری استفاده کنند. همچنین محققان شرکت جنگ‌افزاری لاکهید مارتین^{۳۷} با موانعی در تجاری‌سازی یک دستگاه ناوبری جدید مواجه هستند. این دستگاه مبتنی بر NV، با کمک ناهنجاری‌های کوچک میدان مغناطیسی زمین که پیش‌تر نقشه‌برداری شده‌اند، ناوبری می‌کند [۲۵].

۳-۳- تصویربرداری سه‌بعدی مقاوم در برابر نویز

رهین^{۳۸} و همکارانش، یک سیستم تصویربرداری سه‌بعدی ایجاد

نسبت به نویز پس زمینه است.



شکل ۹: تجهیزات آزمایشی تصویربرداری تک فوتون ۳ بعدی مقاوم در برابر نویز [۲۶] این رویکرد مبتنی بر سخت افزار می تواند استفاده از لیدار را در تنظیمات نویزی که امکان پس پردازش وجود ندارد، تسهیل کند و همچنین می تواند با رویکردهای کاهش نویز مبتنی بر نرم افزار نیز ترکیب شود تا حتی نتایج بهتری بدست دهد. کاهش نویز به روش

کردند، که از خواص کوانتومی نور برای تولید تصاویری ۴۰ هزار برابر واضح تر از فناوری های فعلی استفاده می کنند. این پژوهش می تواند باعث بهبود آشکارسازی و حسگر لیدار، سامانه های نقشه برداری ماهواره ای، ارتباطات اعماق فضا و تصویربرداری پزشکی از شبکیه چشم انسان شود. این فناوری، اولین اثبات واقعی کاهش نویز تک فوتون با استفاده از روشی موسوم به طبقه بندی حالت پارامتری کوانتومی (QPMS^{۳۹}) است که نخستین بار توسط یوپینگ هوانگ پیشنهاد شده است.

برخلاف اغلب ابزارهای فیلترکننده نویز که برای تمیز کردن تصاویر نویزی، متکی بر پس پردازش مبتنی بر نرم افزار هستند، QPMS برای تولید تصاویری به طور نمایی تمیزتر در سطح خود حسگر، نشانه های کوانتومی نور را از طریق اپتیک غیرخطی نامتعارف بررسی می کند (شکل ۹).

پژوهش حاضر، یک مشکل چنددهه ای لیدار را حل می کند. اگرچه آشکارسازهای نوری مورد استفاده در این سیستم ها، به اندازه کافی حساس هستند تا تصاویر دقیقی از تنها چند فوتون ایجاد کنند، اما تفکیک بخش های بازتابی نور لیزر از نور روشن تر پس زمینه، مانند نور خورشید، کار دشواری است. چالش حسگرهای حساس، حساس بودن

جدول ۱: آزمایشات تجربی حسگرهای کوانتومی [۱]

Implementation	Qubit(s)	Measured quantity(ies)	Typical frequency	Initialization	Readout	Type ^a
Neutral atoms						
Atomic vapor	Atomic spin	Magnetic field, Rotation, Time/Frequency	DC-10 GHz	Optical	Optical	II-III
Cold clouds	Atomic spin	Magnetic field, Acceleration, Time/Frequency	DC-10 GHz	Optical	Optical	II-III
Trapped ion(s)						
	Long-lived electronic state	Time/Frequency Rotation	THz	Optical	Optical	II-III
	Vibrational mode	Electric field, Force	MHz	Optical	Optical	II
Rydberg atoms						
	Rydberg states	Electric field	DC, GHz	Optical	Optical	II-III
Solid state spins (ensembles)						
NMR sensors	Nuclear spins	Magnetic field	DC	Thermal	Pick-up coil	II
NV ^b center ensembles	Electron spins	Magnetic field, Electric field, Temperature, Pressure, Rotation	DC-GHz	Optical	Optical	II
Solid state spins (single spins)						
P donor in Si	Electron spin	Magnetic field	DC-GHz	Thermal	Electrical	II
Semiconductor quantum dots	Electron spin	Magnetic field, Electric field	DC-GHz	Electrical, Optical	Electrical, Optical	I-II
Single NV ^b center	Electron spin	Magnetic field, Electric field, Temperature, Pressure, Rotation	DC-GHz	Optical	Optical	II
Superconducting circuits						
SQUID ^c	Supercurrent	Magnetic field	DC-10 GHz	Thermal	Electrical	I-II
Flux qubit	Circulating currents	Magnetic field	DC-10 GHz	Thermal	Electrical	II
Charge qubit	Charge eigenstates	Electric field	DC-10 GHz	Thermal	Electrical	II
Elementary particles						
Muon	Muonic spin	Magnetic field	DC	Radioactive decay	Radioactive decay	II
Neutron	Nuclear spin	Magnetic field, Phonon density, Gravity	DC	Bragg scattering	Bragg scattering	II

QPMS، لیدارها را قادر می‌سازد تا برای ایجاد تصاویر سه‌بعدی دقیق در محدوده‌های بیش از ۳۰ کیلومتر به کار روند. این فناوری همچنین می‌تواند برای ارتباطات اعماق فضا، جایی که تابش خیره‌کننده خورشید می‌تواند پالس‌های از راه دور لیزر را از بین برد، مورد استفاده قرار گیرد. سیستم تصویربرداری استیونز با استفاده از تصویربرداری تک فوتون بدون نویز، به محققان کمک خواهد کرد بتوانند تصاویر واضح و دقیقی از شبکیه چشم انسان با استفاده از باریکه‌ها نامرئی و ضعیف نور لیزر بدست آورند که آسیبی به بافت‌های حساس چشم نرسانند [۲۶].

۳-۴- رادار کوانتومی

یک سیستم رادار برای پیدا کردن مکان یک شی، فاصله و جهتی که شی در آن قرار دارد را شناسایی می‌کند. سیستم برای انجام این کار، امواج رادیویی را ارسال کرده و سپس امواجی که از جسم بازمی‌گردند را اندازه‌گیری می‌کند. اکنون، محققانی روشی آرایه کرده‌اند که از فوتون‌های درهم‌تنیده به عنوان کاوشگرهای رادار استفاده می‌کند. محققان برای توسعه طرح خود، روش پیشنهادی یک بعدی (ID) قبلی را به روش سه‌بعدی (3D) بسط دادند. آن‌ها تمام درجات آزادی فضایی فوتون‌های درهم‌تنیده را محاسبه کردند و نحوه انتشار سیگنال رادار از شی هدف به گیرنده را تحلیل کردند. آن‌ها دریافتند که برای کاوشگرهای رادار با N فوتون درهم‌تنیده، ناحیه‌ی سه‌بعدی موقعیت‌های ممکن یک شی، $N^{3/2}$ در مقایسه با یک طرح رادار کلاسیکی با استفاده از همان تعداد فوتون مستقل، باریک شده است. این روش، محدودیت‌هایی از جمله حساسیت بالا به نویز دارد [۲۷].

۳-۵- تصویربرداری از مغز

حسگرهای کوانتومی همچنین توانایی تصویربرداری از داخل مغز را دارند. مایع داخل جمجمه، به دلیل اینکه رسانای الکتریکی است، سیگنال‌های الکتروانسفالوگراف (EEG)، که یک فناوری تصویربرداری رایج است را از بین می‌برد. این یک مشکل اساسی در هنگام تشخیص و درک اختلالاتی نظیر جنون و زوال عقلی است که شامل ساختارهای مغزی عمیق است. حسگرهای کوانتومی از توسعه مغناطوسفالوگراف (MEG): اندازه‌گیری میدان مغناطیسی ایجاد شده به وسیله گردش جریان از طریق مجامع عصبی در مغز پشتیبانی می‌کند و نشان می‌دهد که مغز چگونه شبکه‌های عصبی را در بازه زمانی میلی‌ثانیه، به‌عنوان بخشی از فرآیند پشتیبانی تشکیل می‌دهد و حل می‌کند. با استفاده از حسگرهای کوانتومی این کار را می‌توان در حالیکه سوژه

حرکت می‌کند، برخلاف ابزارهای فعلی انجام داد. میدان مغناطیسی مغز هنگام ریتم آلفا 0.1 IPT می‌باشد. مگنومتر را در نزدیکی سر بیمار قرار می‌دهند که در نوع تک کانالی، با چرخش آن، میدان مغناطیسی تمام نقاط اندازه‌گیری می‌شود. در نوع چندکانالی، مگنومتر بصورت آرایه‌ای از اسکوئیدها مانند کلاه تمام کاسه سر را پوشش می‌دهد، بدون حرکت می‌توان شار مغناطیسی به‌صورت سیگنال قابل اندازه‌گیری، ثبت شود (شکل ۱۰).

MEG در نقشه‌برداری سطحی و بررسی ماهیت لحظه‌ای تحلیل سیگنال‌ها در مغز در عصب‌شناسی، درد و مکان‌یابی مراکز آسیب و تخلیه حملات صرع کاربرد دارد. به این ترتیب چنین نوآوری‌هایی می‌توانند از تشخیص و نظارت بر سایر شرایط مانند اختلالات کم‌توجهی و بیش‌فعالی حمایت کند [۲۸].

۳-۶- میکروسکوپ نقطه کوانتومی برای اندازه‌گیری پتانسیل تک اتم‌ها

یک روش جدید میکروسکوپی نقطه کوانتومی می‌تواند پتانسیل الکتریکی یک نمونه را با دقت اتمی اندازه بگیرد، که کاربردهای بالقوه‌ای برای ساخت تراشه و تشخیص ملکول‌های زیستی دارد. در روش تصویربرداری جدیدی که محققان ابداع کردند، یک نقطه کوانتومی به نوک یک میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) متصل شد، تا به‌عنوان یک آشکارگر تصویربرداری بدون تماس عمل کند. نقطه کوانتومی به اندازه‌ای کوچک بود که الکترون‌های نوک AFM می‌توانستند به شیوه‌ای کنترل شده به آن متصل شوند. حسگر نقطه کوانتومی و پوشش الکتروستاتیک نوک و سطح، تصویربرداری از مقیاس‌های طولی حتی در سطح تک‌اتم‌ها را امکان‌پذیر کرد.

تمام عناصر یک نمونه، میدان‌های الکتریکی تولید می‌کنند که نقطه کوانتومی را تحت تاثیر قرار می‌دهند و می‌توانند اندازه‌گیری شوند. نوک میکروسکوپ به‌عنوان یک محافظ عمل نموده و میدان‌های مخرب نواحی دورتر نمونه را تعدیل می‌کند. تاثیر میدان‌های الکتریکی محافظت‌شده، به‌طور نمایی کاهش می‌یابد و نقطه کوانتومی فقط ناحیه‌ی اطراف را آشکارسازی می‌کند. بنابراین وضوح این میکروسکوپ بسیار بالاتر از وضوحی است که از یک آشکارگر نقطه‌ای ایده‌آل انتظار می‌رود.

محققان برای امکان اندازه‌گیری سطح نمونه، یک کنترل‌کننده را توسعه دادند که به اتوماتیک کردن توالی تکراری تصویربرداری نمونه کمک کرد. با استفاده از کنترل‌کننده‌ی این میکروسکوپ می‌توان به‌سادگی، کل سطح را اسکن کرد. درحالی‌که تصویربرداری از یک ملکول، ۵ تا ۶ ساعت زمان می‌برد، اکنون می‌توان نمونه‌ای با صدها ملکول را تنها در یک ساعت، تصویربرداری کرد [۲۹].

۴- تجاری‌سازی حسگرهای کوانتومی

یکی از موارد مهمی که باید در زمینه تجاری‌سازی این تکنولوژی مدنظر قرار داد، توجه به زنجیره عملیات مورد نیاز برای آن است. استفاده از ابزارهایی در ساخت حسگرهای کوانتومی که نسبت به ادوات فعلی با دقت مشابه دارای قیمت کمتر و سایز بسیار کوچکتر باشد. لذا می‌توان این انتظار را داشت که بسیاری از محدودیت‌های آرایه به بازار را در زمینه‌های مختلفی همچون ژئوفیزیک و مسیریابی برطرف نماید.

لیزرها: لیزرها از جمله ادوات ضروری مورد نیاز جهت ساخت در مقیاس نانو می‌باشند. استفاده از لیزرهای تجمیعی نیمه‌هادی که دارای ۱٪ هزینه ۰/۱٪ سایز سیستم‌های لیزر صنعتی برای اهداف تداخل‌سنجی اتمی است، می‌تواند گزینه جایگزین مناسبی باشند.



شکل ۱۰: طراحی و ساخت قالب سر برای تصویربرداری از مغز [۲۸]

جهت کاربردهای ژئوفیزیک و دفاعی وجود دارند. از طرفی همچنان پتانسیل کوچک‌سازی و کاهش قیمت برای این دست حسگرها وجود دارد. دو حوزه‌ای که می‌توان هدف‌گذاری این جهش تکنولوژیکی را روی آن‌ها قرار داد، شامل حسگرهای جاذبه مطلق که در زمینه اندازه‌گیری تعاریف فیزیکی مرسوم کاربرد دارند و دیگری حسگرهای جاذبه آرایه‌ای یا متغیر که جهت عملیات در اعماق زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند. این فناوری بر مبنای تداخل‌سنجی سقوط آزاد اتمی خواهد بود، که در حال حاضر از جمله دقیق‌ترین روش‌های موجود است. در نهایت این دورنما منجر به تولید حسگرهای جاذبه با قابلیت تصویربرداری و حساسیت nano-g می‌شود.

حسگرهای مغناطیسی: امروزه حسگرهای مغناطیسی در رنج اندازه میکرو تا ماکرو می‌توانند کاربردهای زیادی داشته باشند. به‌طورمثال یکی از تحقیقات جالب در این زمینه ارتقای میکروسکوپ مغناطیسی اتمی سرد با تصویربرداری یک بعدی در مقیاس میلی‌متری و با رزولوشن میکرونی با قابلیت آنالیز استروبو اسکوپ پیوندهای دینامیکی و همچنین مغناطیس‌سنجی تغییرات آرایه‌های یونی در مقیاس میلی‌متر تا سانتی‌متر بدون نویز می‌باشد که می‌تواند جایگاه خوبی در بازار فعلی پیدا کند. همچنین در ابعاد بزرگتر از سانتی‌متر، حسگرهای مغناطیسی با اتم‌های حرارتی در میکرومحفظه می‌توانند به‌خوبی با افزاره‌های تداخل‌سنج کوانتومی ابرهادی از لحاظ حساسیت رقابت کنند که منجر به کاهش هزینه و صدمات زیست‌محیطی می‌شود.

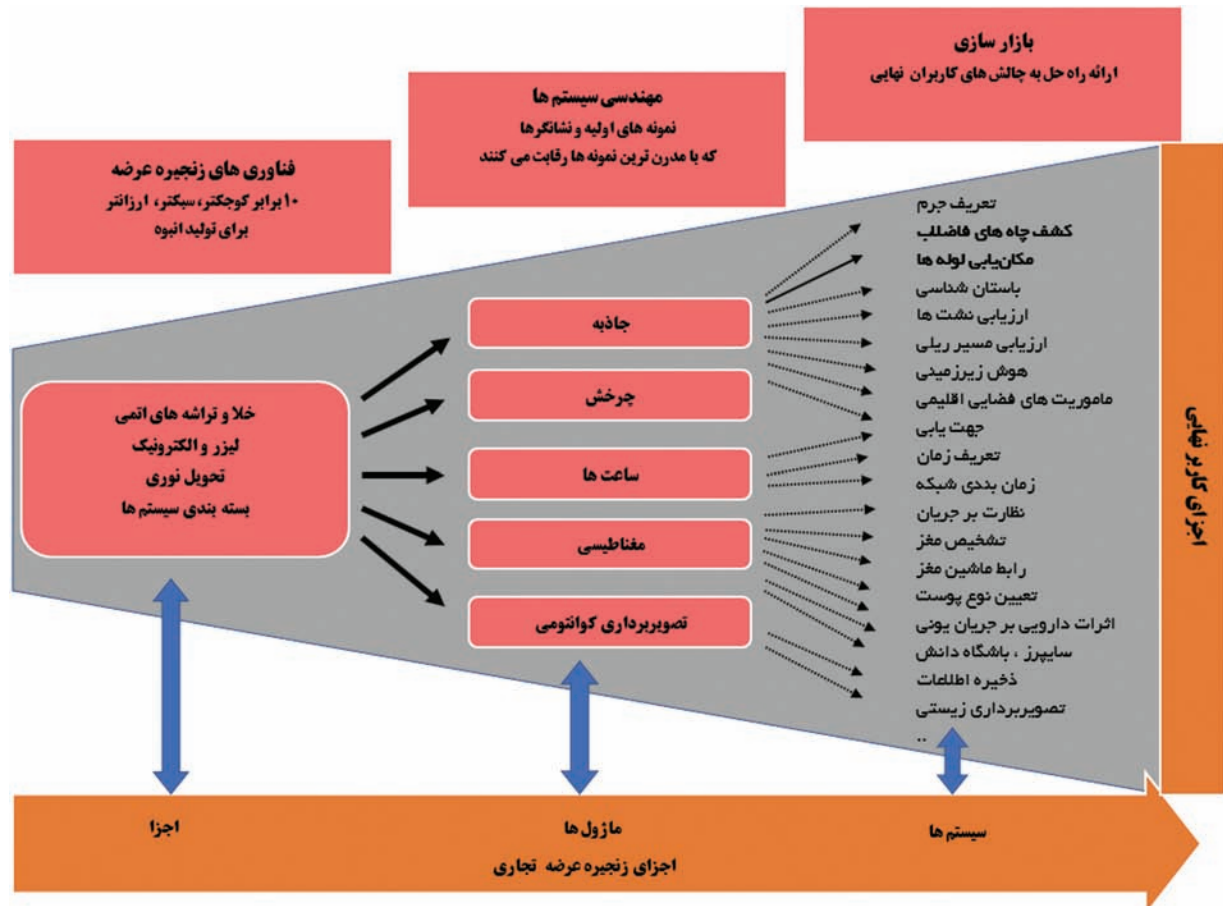
حسگرهای دورانی: در حال حاضر نمونه حسگر اتمی سرد صنعتی

نوع دیگری از لیزرها با عنوان لیزرهای تیلورد^{۴۰} شناخته می‌شوند، که در زمینه حسگرهای کوانتومی کاربرد دارند. این دست لیزرها براساس تکنولوژی وسل^{۴۱} می‌باشد که در حال حاضر می‌تواند با توجه به ویژگی‌هایی چون کوچک بودن، صلبیت، پایداری و انعطاف‌پذیری طیف جایگزین سیستم‌های توان بالای صنعتی شوند. همچنین نوع دیگر از لیزرهای مناسب جهت استفاده لیزرهای همگرای فمتوثانیه هستند.

بسته‌بندی اتمی: این قسمت فضایی را جهت استفاده از اتم‌ها و یون‌ها به‌عنوان اجزای پروب دستگاه فراهم می‌آورد، که شامل ایجاد خلا و میدان الکتریکی و مغناطیسی می‌شود. یکی از ترندهای مناسب در این زمینه استفاده از چیپ‌های آرایه یونی می‌باشد، که می‌تواند بر محدودیت تک‌یونی در مغناطیس‌سنجی و ساعت‌ها غلبه نماید. محفظه‌های خلا بدون پمپ با استفاده از ارتقای تکنولوژی خلا اتمی سرد قابل تولید با هزینه پایین و تعداد بالا می‌باشد.

بسته‌بندی سیستمی: تبدیل اجزای مختلف حسگر به یک سیستم مستقل و یکپارچه مستلزم یک عملیات مهندسی پیچیده است. علاوه بر تکنولوژی‌های موجود فعلی، استفاده از پرینترهای سه بعدی در مقیاس کوچک و شیلدهای مغناطیسی می‌توانند گزینه‌های بهینه‌ای باشند. جهت نمونه‌سازی برای حسگرهای مختلف، نیاز به مهارت‌ها و فرآیندهای به‌خصوصی است. در ادامه ویژگی حسگرهای مختلف تجاری‌سازی شده از نظر ساخت، بهینه‌سازی و بهبود عملکرد مورد بررسی قرار می‌گیرند.

حسگرهای جاذبه: در این حوزه، حسگرهای کوچک با کارایی بالا



شکل ۱۱: سلسله مراتب و تجهیزات کلیدی برای تجاری‌سازی حسگرهای کوانتومی [۳۰]

جهت اندازه‌گیری‌های دورانی در بازار یافت نمی‌شود. برای غلبه بر چالش موجود در زمینه حسگرهای دورانی سرد، می‌توان از تکنیک‌های پالسی بهره گرفت و از آن‌ها جهت ساخت ژيروسکوپ‌های اتمی سرد کوچک بهره برد. البته به موازات این طرح، باید راهکارهای کوچک‌سازی تجهیزات هم مورد بررسی قرار گیرد. ضمن اینکه می‌توان در صورت نیاز از روش‌های جایگزینی چون تکنولوژی موجبرهای برپایه مایکروویو برای حسگرهای دورانی استفاده نمود.

ساعت‌های اتمی: ساعت‌های اتمی برپایه اتم‌های داغ پیش از این به‌صورت تجاری عرضه شده‌اند و در زمینه شبکه‌های ارتباطی، جهت یابی و تحقیقات آزمایشگاهی کاربرد دارد.

در صورت مدنظر قرار دادن ارتقای نسل جدید ساعت‌ها بر مبنای تکنولوژی اتمی سرد دو مسیر قابل تصور است. مورد اول ساعت مایکروویو اتمی سرد کوچک با حساسیت^{۱۳-۱۰} براساس تکنولوژی شبکه‌ای تک‌پرتویی است، که منجر به بهبود شرایط از لحاظ هزینه، سایز و پایداری نسبت به مدل‌های موجود می‌شود. مورد دوم، ساعت نوری با حساسیت^{۱۶-۱۰} در یک طراحی قابل حمل بر مبنای عنصر استرانسیوم در شبکه نوری است.

تصویربرداری کوانتومی: در این حوزه ارتقای منابع نور کوانتومی کوچک منجر به فشردن مد چندفضایی می‌شود، که خود می‌تواند سطح نویز را جهت تصویربرداری به شدت کاهش دهد. در نهایت در صورت عملکرد مثبت و نداشتن دورنما در راستای ارایه ادوات ساخته شده بر مبنای تکنولوژی کوانتومی می‌توان بازاری در حدود ۱ میلیارد در سال را پیش بینی کرد، که مهم‌ترین حوزه‌های مورد استفاده شامل مهندسی عمران جهت کاوش‌های زیرزمینی و همچنین کاربردهای پزشکی می‌باشد [۳۰].

۵- چشم‌انداز حسگرهای کوانتومی

حسگری کوانتومی، برخلاف تاریخچه‌ی غنی‌اش در طیف‌سنجی اتمی و تداخل‌سنجی کلاسیکی، یک حوزه‌ی هیجان‌انگیز جدید و تازه است، که در حاشیه‌ی حوزه‌ی اصلی مهندسی کوانتومی، به سرعت در حال رشد است. حسگری کوانتومی برخلاف سایر حوزه‌ها، بخش‌های مختلف علم و فناوری را برای ایجاد فرصت‌ها و کاربردهای بنیادی جدید متحد کرده است.

در حالی که تاکنون بسیاری از آزمایش‌ها از حسگرهای تک‌کیوبیت استفاده کرده‌اند، کشف راهبردهای پیاده‌سازی حسگرهای چندکیوبیتی درهم‌تنیده با قابلیت‌های بهبودیافته و حساسیت بالاتر، شروع شده است. یکی از بزرگ‌ترین جذابیت‌های حسگرهای کوانتومی، پتانسیل فوری آن‌ها برای کاربردهای عملی است. این پتانسیل، تا حدودی به دلیل محدوده‌ی عظیم پیاده‌سازی‌های حسگرهای کشف‌شده (آغاز شده با سیستم‌های اسپین حالت جامد و اتمی و در ادامه با درجات آزادی ارتعاشی و الکترونی از مقیاس اتمی تا ماکرو) است. در حقیقت، حسگرهای کوانتومی مبتنی بر مغناطیس‌سنج‌های SQUID و بخارهای اتمی، در حال حاضر مورد استفاده روزمره بوده به‌عنوان حساس‌ترین آشکارسازهای میدان مغناطیسی که در حال حاضر در دسترس هستند، شناخته می‌شوند. به همین ترتیب، ساعت‌های اتمی، به استاندارد اصلی برای زمان‌سنجی و تولید فرکانس تبدیل شده‌اند مراکز NV در الماس به دلیل اندازه کوچکشان، به‌شدت در حال تسخیر بسیاری از کاربردهای تصویربرداری مقیاس نانو هستند.

با ظهور حسگرهای جدید و پیاده‌سازی‌های بالغ‌تر، محدوده کاربردها همچنان توسعه خواهد یافت. با در نظر گرفتن اثری که

مغناطیس‌سنج‌های کوانتومی و ساعت‌های اتمی در قلمروی خاص خود داشتند، می‌توان انتظار داشت که حسگرهای کوانتومی به بیشتر فناوری‌های قرن بیست‌ویکم نفوذ کرده و جای خود را هم در دستگاه‌های سطح بالا و هم مصرف‌کننده باز کنند. دسترس‌پذیری مواد بهتر و کنترل دقیق‌تر، پیشرفت حسگرهای کوانتومی را کنترل می‌کند. حسگری کوانتومی به طور همزمان، از پژوهش‌های فناوری کوانتومی، به ویژه در محاسبات کوانتومی که بسیاری از مفاهیم بنیادی توسعه یافته‌اند، بهره خواهد برد. از طرفی، حسگری کوانتومی، به منبع مهمی برای فناوری‌های کوانتومی تبدیل خواهد شد که به‌ویژه از طریق طیف‌سنجی و اهمدوسی، دید بهتری را از محیط کیوبیت‌ها بدست می‌دهد [۱].

۶- نتیجه‌گیری

حسگرهای کوانتومی از حالت‌های کوانتومی برای حسگری استفاده می‌کنند. آن‌ها بر این واقعیت استوارند که حالت‌های کوانتومی به نوبت بسیار حساس هستند، که این بدان معنی است که، آن‌ها همچنین توانایی تبدیل به ابزار اندازه‌گیری فوق‌العاده حساس را دارند.

دستگاه‌های اندازه‌گیری که از خواص کوانتومی بهره می‌برند، مانند ساعت‌های اتمی و یا تصویربرداری رزونانس مغناطیسی که برای تشخیص پزشکی به کار برده می‌شود مدت‌هاست که پیرامون ما وجود داشته‌اند، اما آنچه که به عنوان ابزار جدید در نظر گرفته می‌شوند، سیستم‌های کوانتومی جداگانه، مانند اتم‌ها و فوتون‌ها، به‌طور فزاینده‌ای به عنوان کاوشگرهای اندازه‌گیری استفاده می‌شوند و از درهم‌تنیدگی و دستکاری حالت‌های کوانتومی برای افزایش حساسیت استفاده می‌کنند.

درک بهتر و اهمدوسی در یک پیاده‌سازی خاص یک سیستم کوانتومی می‌تواند به اتخاذ راهبردهایی برای محافظت از کیوبیت کمک کرده و توسعه‌ی مواد و مهندسی را هدایت نماید. همچنین مرز بین شبیه‌سازی کوانتومی و حسگری کوانتومی، در حال تبدیل شدن به زمین حاصلخیزی برای شبیه‌سازی و آشکارسازی پدیده‌های فیزیک چندزده‌ای است. در نهایت، حسگری کوانتومی، پتانسیل لازم برای تغییر بنیادی قابلیت‌های اندازه‌گیری، امکان حساسیت و دقت بالاتر را داراست.

یک چالش رایج در سنجش کوانتومی تعارض بین جداسازی حالت‌های کوانتومی حساس از اختلالات بیرونی است، در حالی که در عین حال قادر به دستکاری حالت‌های کوانتومی و قرار دادن آن‌ها در برابر مقدار فیزیکی است که باید اندازه‌گیری شود. از لحاظ تئوری، حسگرهای کوانتومی از مزیت اندازه‌گیری‌های بسیار دقیق‌تر نسبت به حسگرهای معمولی برخوردار هستند. اما برای اینکه از نظر تجاری جذاب‌تر شوند، این مزیت را باید در عمل با قیمت مناسب تحقق بخشید.

پی‌نوشت‌ها

- 1 quantum sensing
- 2 quantum entanglement
- 3 quantum sensors
- 4 DiVincenzo
- 5 Rydberg
- 6 Stark
- 7 Barredo
- 8 Spontaneous parametric down-conversion
- 9 volume Bragg grating

- vol. 366, no. 6471, pp. 1349–1354, 2019.
- [11] A. Gottscholl et al., "Initialization and read-out of intrinsic spin defects in a van der Waals crystal at room temperature," *Nat. Mater.*, 2020.
- [12] T. M. Karg, B. Gouraud, C. T. Ngai, G.-L. Schmid, K. Hammerer, and P. Treutlein, "Light-mediated strong coupling between a mechanical oscillator and atomic spins 1 meter apart," *Science* (80-.), p. eabb0328, 2020.
- [13] S. T. Velez, K. Seibold, N. Kipfer, M. D. Anderson, V. Sudhir, and C. Galland, "Preparation and Decay of a Single Quantum of Vibration at Ambient Conditions," *Phys. Rev. X*, vol. 9, no. 4, p. 41007, 2019.
- [14] C. Abel et al., "Measurement of the Permanent Electric Dipole Moment of the Neutron," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 124, no. 8, p. 81803, 2020.
- [15] Q. Zhong, J. Ren, M. Khajavikhan, D. N. Christodoulides, K. Özdemir, and R. El-Ganainy, "Sensing with Exceptional Surfaces in Order to Combine Sensitivity with Robustness," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 122, no. 15, p. 153902, 2019.
- [16] M. Lee et al., "Ion-Based Quantum Sensor for Optical Cavity Photon Numbers," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 122, no. 15, p. 153603, 2019.
- [17] S. J. Gibson et al., "Tapered InP nanowire arrays for efficient broadband high-speed single-photon detection," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 14, no. 5, pp. 473–479, 2019.
- [18] J. Cripe et al., "Measurement of quantum back action in the audio band at room temperature," *Nature*, vol. 568, no. 7752, pp. 364–367, 2019.
- [19] V. V. Zemlyanov et al., "Phase estimation algorithm for the multibeam optical metrology," *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–8, 2020.
- [20] K. E. McAlpine, D. Gochner, and S. Gupta, "Excited-band Bloch oscillations for precision atom interferometry," *Phys. Rev. A*, vol. 101, no. 2, p. 23614, 2020.
- [21] L. Gu et al., "Molecular resolution imaging by repetitive optical selective exposure," *Nat. Methods*, vol. 16, no. 11, pp. 1114–1118, 2019.
- [22] Q. Bouton et al., "Single-Atom Quantum Probes for Ultracold Gases Boosted by Nonequilibrium Spin Dynamics," *Phys. Rev. X*, vol. 10, no. 1, p. 11018, 2020.
- [23] M. Mehboudi, A. Lampo, C. Charalambous, L. A. Correa, M. Á. García-March, and M. Lewenstein, "Using Polarons for sub-nK Quantum Nondemolition Thermometry in a Bose-Einstein Condensate," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 122, no. 3, pp. 3–7, 2019.
- [24] R. Kokkonen et al., "Nanobolometer with ultralow noise equivalent power," *Commun. Phys.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2019.
- [25] E. Cartlidge, "Quantum Sensors: A Revolution in the Offing?" *Opt. Photonics News*, vol. 30, no. 9, p. 24, 2019.
- [26] P. Rehain et al., "Noise-tolerant single photon sensitive three-dimensional imager," *Nat. Commun.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–7, 2020.
- [27] L. Maccone and C. Ren, "Quantum Radar," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 124, no. 20, p. 200503, 2020.
- [28] E. Boto et al., "A new generation of magnetoencephalography: Room temperature measurements using optically-pumped magnetometers," *Neuroimage*, vol. 149, no. January, pp. 404–414, 2017.
- [29] C. Wagner et al., "Quantitative imaging of electric surface potentials with single-atom sensitivity," *Nat. Mater.*, vol. 18, no. 8, pp. 853–859, 2019.
- [30] K. Bongs et al., "The UK National Quantum Technologies Hub in sensors and metrology (Keynote Paper)," *Quantum Opt.*, vol. 9900, no. June, p. 990009, 2016.

- 10 periodically poled lithium niobite
 11 indium tin oxide
 12 Norcia
 13 Larmor
 14 Nitrogen-Vacancy
 15 optically detected magnetic resonance
 16 Diamond anvil cell
 17 Hsieh
 18 Gottscholl
 19 Aharonov-Bohm
 20 Josephson
 21 neutron electric dipole moment
 22 micro ring
 23 Zhong
 24 Lee
 25 Ramsey spectroscopy
 26 single-photon-counting module
 27 Gibson
 28 back action
 29 repetitive optical selective exposure
 30 single-molecule localization microscopy
 31 Bouton
 32 Mehboudi
 33 Bose-Einstein condensate
 34 Muquans
 35 Bongs
 36 Thales
 37 Lockheed Martin
 38 Rehain
 39 quantum parametric mode sorting
 40 tailored
 41 VECSEL

مراجع

- [1] C. L. Degen, F. Reinhard, and P. Cappellaro, "Quantum sensing," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 89, no. 3, pp. 1–45, 2017.
- [2] Y. J. Chen et al., "Single-Source Multi-axis Cold-Atom Interferometer in a Centimeter-Scale Cell," *Phys. Rev. Appl.*, vol. 12, no. 1, p. 1, 2019.
- [3] K. R. Rusimova et al., "Atomic dispensers for thermoplasmonic control of alkali vapor pressure in quantum optical applications," *Nat. Commun.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–8, 2019.
- [4] D. Barredo et al., "Three-Dimensional Trapping of Individual Rydberg Atoms in Ponderomotive Bottle Beam Traps," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 124, no. 2, 2020.
- [5] M. Kutas, B. Haase, P. Bickert, F. Riexinger, D. Molter, and G. von Freymann, "Terahertz quantum sensing," *Sci. Adv.*, vol. 6, no. 11, 2020.
- [6] D. H. Meyer, Z. A. Castillo, K. C. Cox, and P. D. Kunz, "Assessment of Rydberg atoms for wideband electric field sensing," *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.*, vol. 53, no. 3, 2020.
- [7] M. A. Norcia, A. W. Young, W. J. Eckner, E. Oelker, J. Ye, and A. M. Kaufman, "Seconds-scale coherence on an optical clock transition in a tweezer array," *Science* (80-.), vol. 366, no. 6461, pp. 93–97, 2019.
- [8] Q. Zhuang, Z. Zhang, and J. H. Shapiro, "Distributed quantum sensing using continuous-variable multipartite entanglement," *Phys. Rev. A*, vol. 97, no. 3, pp. 1–7, 2018.
- [9] D. Kim, M. I. Ibrahim, C. Foy, M. E. Trusheim, R. Han, and D. R. Englund, "A CMOS-integrated quantum sensor based on nitrogen-vacancy centres," *Nat. Electron.*, vol. 2, no. 7, pp. 284–289, 2019.
- [10] S. Hsieh et al., "Imaging stress and magnetism at high pressures using a nanoscale quantum sensor," *Science* (80-.),