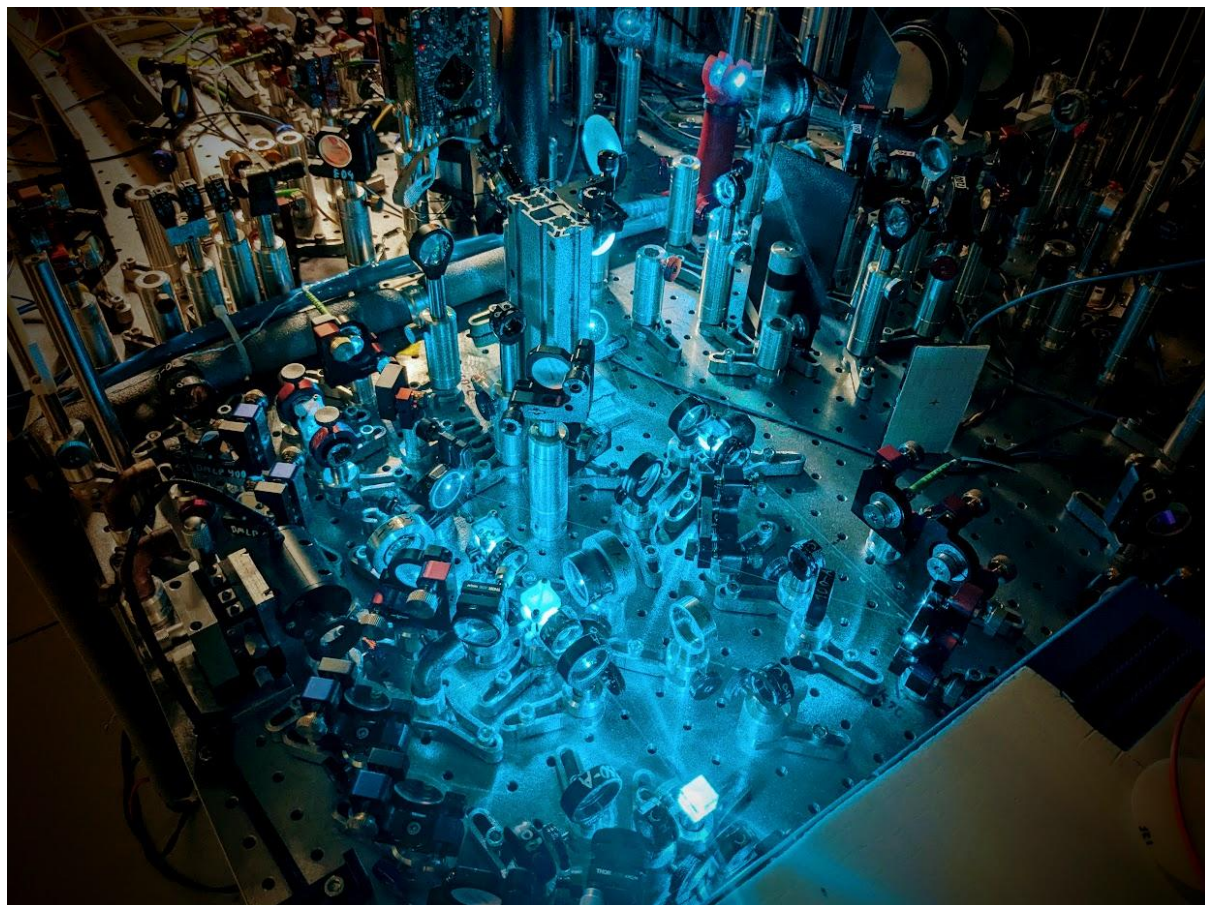
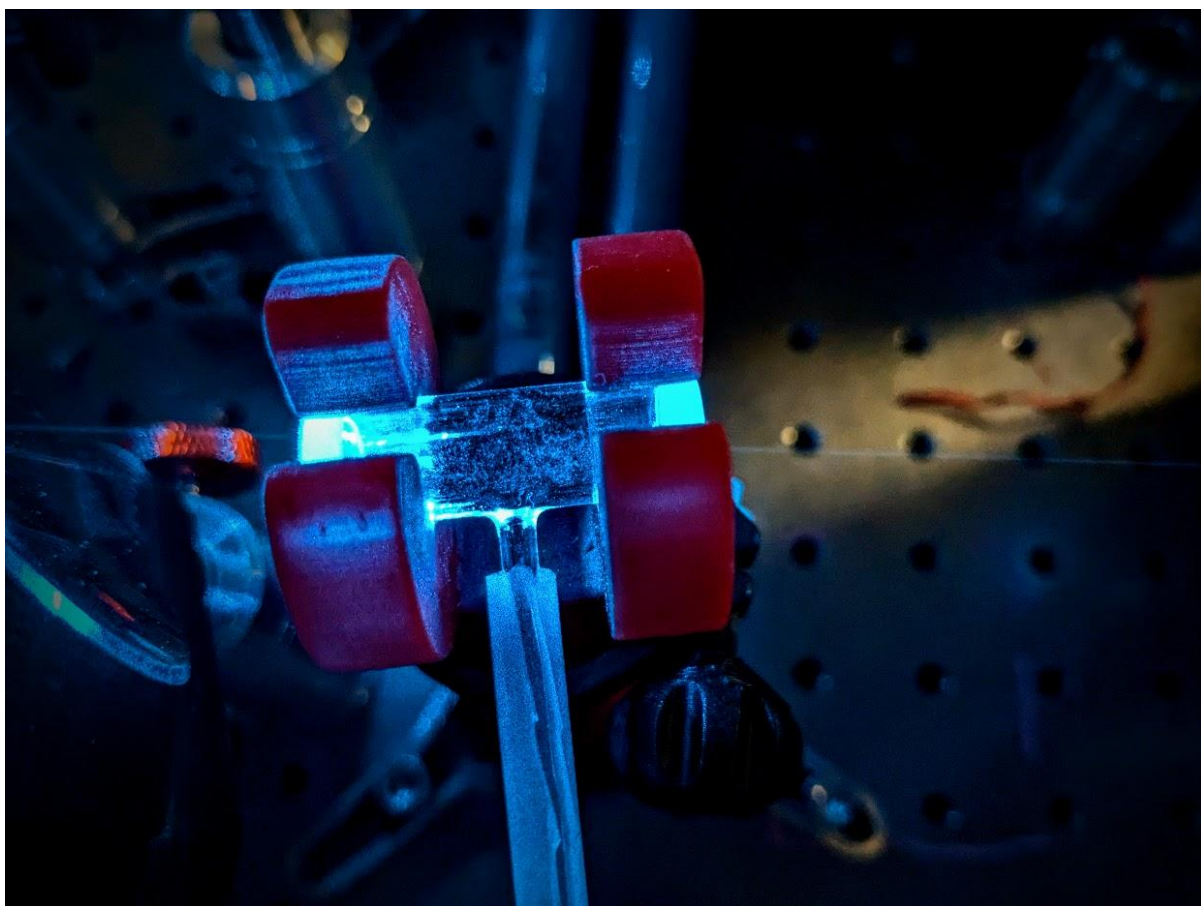


Kwantowa antena radiowa



Układ eksperymentalny sterujący kwantową anteną radiową (fot. Michał Parniak, Uniwersytet Warszawski)

Zespół z Wydziału Fizyki oraz Centrum Optycznych Technologii Kwantowych opracował nowy rodzaj całkowicie optycznego odbiornika radiowego, który opiera się na fundamentalnych własnościach atomów rydbergowskich. Nowy rodzaj odbiornika jest nie tylko niezwykle czuły, ale zapewnia też wewnętrzną kalibrację, a sama antena zasilana jest jedynie światłem laserowym. Wyniki prac, w których wzięli udział Sebastian Borówka, Mateusz Mazelanik, Wojciech Wasilewski i Michał Parniak, opublikowano w prestiżowym czasopiśmie *Nature Communications*. Otwierają one nowy rozdział w technologicznym wdrażaniu sensorów kwantowych.



W pełni optyczna kwantowa antena radiowa – szklana komórka z rubidem zasilana laserami (fot. Michał Parniak, Uniwersytet Warszawski)

We współczesnym społeczeństwie w każdej sekundzie wokół nas przekazywane są ogromne ilości cyfrowych informacji. Wiele z nich transmitowanych jest radiowo, czyli przy pomocy fal elektromagnetycznych. Od bardzo dawna do kodowania informacji wykorzystuje się amplitudę, wysyłając raz silniejsze, a raz słabsze fale. W nowszych protokołach zmieniamy także fazę fal, czyli opóźnienie ich drgania względem umówionego taktu. W każdym współczesnym nadajniku i odbiorniku montuje się precyzyjne metronomy, które określają takt służący do nadawania fal i ich dekodowania – w żargonie technicznym określa się to mianem detekcji superheterodynowej.

Informacja ukryta w falach

Technologie te można łatwo wytłumaczyć przy pomocy analogii. Prof. Wojciech Wasilewski sugeruje wyobrazić sobie odbieranie fal morskich: aby stojąc na plaży odebrać informacje zakodowane w falach, należy notować zarówno siłę fal – jak głęboko wlewają się na plażę – oraz dokładne chwile uderzenia fal o brzeg. Podobnie jest z „nadawaniem” fal przy pomocy łyżeczki w filiżance herbaty: gdybyśmy byli nadajnikiem WiFi, to łyżeczkę należałoby zanurzać w rytmie

miarowym, w takt, który wybijają obwody kontrolne. Nie należałoby jednak działać od razu na każde ich zawołanie, tylko z opóźnieniem, za każdym razem dokładnie takim samym. Raz na kilka tysięcy okresów trzeba by zmienić głębokość oraz opóźnienie – część taktu, zgodnie z którym zanurzamy łyżeczkę. Tak uzyskalibyśmy modulację amplitudowo-fazową (QAM – quadrature amplitude modulation).

W praktyce do odbierania transmisji powszechnie używane są anteny metalowe, które przekierowują energię nadchodzących fal do odbiornika. Absorpcja energii umożliwia elektroniczny pomiar amplitudy i fazy fal. Pomiaru takiego dokonuje się współcześnie poprzez przemianę (mieszanie) częstotliwości. Sygnał elektryczny z anteny, który drga miliardy razy na sekundę (z częstotliwością gigahercową), jest kierowany do tzw. mieszaczy, które umożliwiają demodulację – przeniesienie amplitudy i fazy bardzo szybkich drgań na sygnały o mniejszej częstotliwości, drgające już tylko miliony razy na sekundę (z częstotliwością megahercową). Na tym etapie możliwe jest łatwe oddzielenie sąsiednich kanałów, których nie chce się akurat odbierać. Współczesna elektronika bez problemu dokonuje cyfrowego pomiaru napięcia kilkadziesiąt milionów razy na sekundę. Z tych pomiarów rekonstruuje się pełny przebieg drgań, a stąd, przy pomocy algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów, ich amplitudę i fazę.

Zsynchronizowany taniec atomów

Jak tłumaczy dr hab. Michał Parniak „w naszych eksperymentach **zastąpiliśmy antenę i elektroniczny mieszacz nowym medium** – rodzajem sztucznej zorzy polarnej”. W szklanej, dokładnie opróżnionej z powietrza komórce umieszczono opilek rubidu, z którego uwalniają się i wyfruwają do wnętrza bańki atomy. Zaprzęgnięto je następnie do starannie zaplanowanego przedstawienia. Każdy atom rubidu ma jeden dość swobodny elektron, któremu narzucono skomplikowaną choreografię tańca wokół jądra i rdzenia złożonego z pozostałych 36 elektronów. Rolę muzyki w tym tańcu pełnią trzy różne lasery. Ich takt drgań jest ultraprecyzyjnie stabilizowany do możliwych częstotliwości wirowania elektronów w atomach rubidu, określonych instrumentarium praw mechaniki kwantowej. Elektronom zagrano taką „melodię”, aby spędziły wybrane części taktów laserowego tańca na bardzo, bardzo odległej orbicie – w tak zwanych stanach rydbergowskich. Na tych orbitach ich trajektoria bardzo łatwo zakrzywia się pod wpływem mikrofal. Konkretnie, pod wpływem tych fal radiowych, które zgodne są co do rytmu z granym laserowym tańcem. Każdy elektron w stanie rydbergowskim – wyniesiony na wysoką orbitę – nie może jednak przebywać tam dowolnie długo i ostatecznie musi spaść niczym satelita wyłączony z użytku. Elektrony odchylone falami radiowymi spadają inną trajektorią i emitują promieniowanie podczerwone inne niż użyte lasery, dzięki czemu łatwo je zarejestrować. Co najważniejsze, faza mikrofal odwzorowuje się w fazie emitowanej podczerwieni: jeśli fale radiowe „uderzały” wcześniej w ramach

ustalonego taktu, to także elektrony spadają nieco wcześniej i wcześniej emitują promieniowanie.

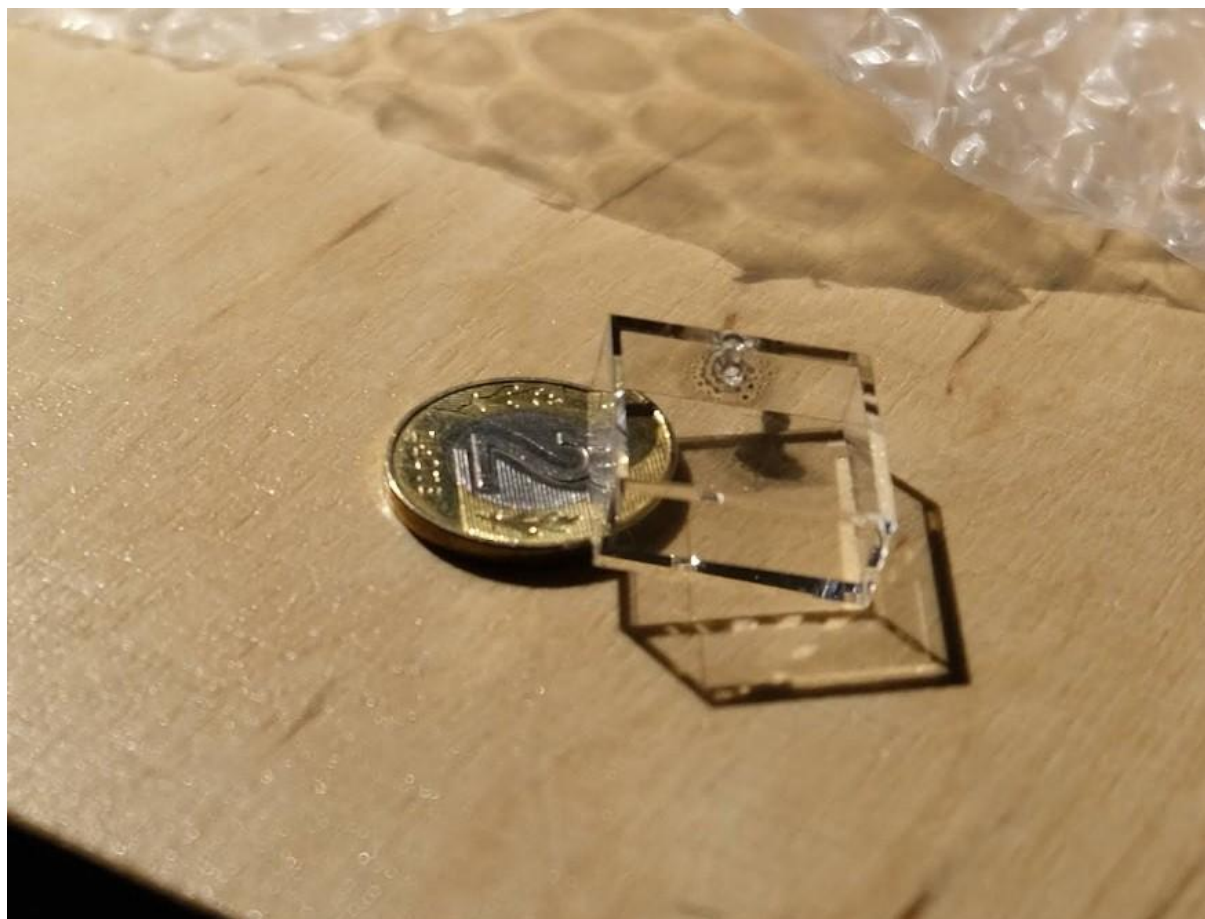
Wyzwaniem, które rozwiązano w najnowszej publikacji, było zbudowanie układu do precyzyjnie miarowego dyrygowania laserami i tańcem elektronów, tak aby rytm ruchu elektronów nigdy nie zwalniał ani nie przyspieszał w niekontrolowany sposób. W tym celu użyto szeregu „metronomów”. Dla każdego lasera skonstruowano specjalną próżniową rurkę zakończoną bardzo dobrymi lustrami, w której światło odbija się kilka tysięcy razy. Taka rurka, zwana wnęką optyczną, niczym organowa piszczałka albo struna skrzypiec, wybiera wyłącznie drgania o określonej częstotliwości. W wykorzystanych tutaj rurkach drgają naraz dwa pola – stabilizowanego lasera oraz lasera wzorcowego, którego częstotliwość jest precyzyjnie elektronicznie uzgodniona z okresem najniższej orbity, po jakiej elektrony mogą obiegać jądro i rdzeń rubidu. Ponadto wykorzystano specjalny kryształ do mieszania częstotliwości, aby wytworzyć referencyjne promieniowanie podczerwone z użytych laserów. Kryształ nie jest czuły na mikrofały, dlatego też podczerwień, którą emituje, ma nieco inną częstotliwość niż ta, którą emitują atomy rubidu. Praktyczny pomiar wymaga użycia dodatkowego lasera wzorcowego, względem którego zmierzono podczerwień wyemitowaną z atomów, oraz referencyjną podczerwień z kryształu mieszającego. Taki względny pomiar – optyczna heterodyna – umożliwia uzyskanie amplitudy i fazy badanych pól. Z kolei z nich można bezpośrednio obliczyć amplitudę i fazę odbieranych mikrofał.

Niewykrywalne wykrywanie pól radiowych

W sercu zaprezentowanych eksperymentów, czyli w komórce z rubidem, **nie ma metalowych, przewodzących prąd i silnie zaburzających fale radiowe elementów**. Wszystko, czego potrzeba do konwersji fal radiowych na podczerwień, to opary rubidu, szczelna obudowa i lasery. W przyszłości detektor będzie mógł mieć postać zaledwie zgrubienia na światłowodzie, przy pomocy którego dostarczone zostaną wszystkie potrzebne lasery, jak również odebrane promieniowanie podczerwone, wysyłane w przeciwnym kierunku w światłowodzie. Ostateczne pomiary i korekcja będą przeprowadzone nawet kilkadziesiąt metrów z dala od pól radiowych, dzięki czemu możliwe będzie niezwykle dyskretne, nieinwazyjne mierzenie i odbieranie pola radiowego.

Wynalazek ten może nieść ze sobą poważne konsekwencje dla technik precyzyjnej kalibracji pól mikrofalowych. Dzięki nieinwazyjnym pomiarom możliwe będzie zarejestrowanie słabych pól bez ich jednoczesnego zaburzania metalową anteną. Można również wyobrazić sobie doskonale ukrycie takiego sensora mikrofalowego

działającego jako podsłuch. W odróżnieniu od obecnie dostępnej elektroniki byłby on znacznie trudniejszym do wykrycia odbiornikiem wszelkich transmisji radiowych.



Szklana komórka z rubidem – miniaturowa antena przyszłości (fot. Michał Parniak, Uniwersytet Warszawski)

Naukowcy w Centrum Optycznych Technologii Kwantowych i na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego od kilku lat zajmują się projektowaniem i demonstrowaniem w praktyce nowych protokołów wykrywania pól mikrofalowych z wykorzystaniem atomów rydbergowskich. Zespołowi udaje się przesuwać i znosić techniczne bariery oraz opracowywać nowe metody detekcji oferowane przez te rewolucyjne urządzenia. Naukowcy współuczestniczą w poszukiwaniu zastosowań dla tej nowej technologii, wskazując na łatwość kalibracji, wysoką czułość i dokładność pomiarów, oraz perspektywę miniaturyzacji urządzeń. Szybko postępujący rozwój technologiczny przyciąga zainteresowanie zagranicznych i międzynarodowych agencji standaryzacji pomiarów, instytutów wojskowych oraz agencji kosmicznych, planujących w przyszłości umieszczać rydbergowskie sensory na satelitach. Od początku 2025 r. zespół pod kierownictwem dr. hab. Michała Parniaka komercjalizuje również tę technologię w projekcie wykonywanym na zlecenie Europejskiej Agencji Kosmicznej.

Badania były jednym z centralnych wyników projektu SONATA17 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

Projekt "Optyczne Technologie Kwantowe" (FENG.02.01-IP.05-0017/23) jest realizowany w ramach działania 2.1 Międzynarodowe Agendy Badawcze Fundacji na rzecz Nauki Polskiej współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków 2. Priorytetu Programu Fundusze Europejskie dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (FENG).



Fundusze Europejskie
dla Nowoczesnej Gospodarki



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Fundacja na rzecz
Nauki Polskiej

Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Fizyka i astronomia na Uniwersytecie Warszawskim pojawiły się w 1816 roku w ramach ówczesnego Wydziału Filozofii. W roku 1825 powstało Obserwatorium Astronomiczne. Obecnie w skład Wydziału Fizyki UW wchodzi Instytuty: Fizyki Doświadczalnej, Fizyki Teoretycznej, Geofizyki, Katedra Metod Matematycznych Fizyki oraz Obserwatorium Astronomiczne. Badania pokrywają niemal wszystkie dziedziny współczesnej fizyki, w skalach od kwantowej do kosmologicznej. Kadra naukowo-dydaktyczna Wydziału składa się z ponad 250 nauczycieli akademickich. Na Wydziale Fizyki UW studiuje ponad 1000 studentów i ok. 150 doktorantów. Uniwersytet Warszawski w rankingu szanghajskim dla poszczególnych dziedzin (Shanghai's Global Ranking of Academic Subjects) znajduje się wśród 300 najlepszych na świecie jednostek, kształcących w dziedzinie fizyki.

PUBLIKACJA NAUKOWA:

S. Borówka, M. Mazelanik, W. Wasilewski, M. Parniak

Optically-biased Rydberg microwave receiver enabled by hybrid nonlinear interferometry

Nature Communications (2025), <https://www.nature.com/articles/s41467-025-63951-9>, doi: 10.1038/s41467-025-63951-9

KONTAKT:

dr hab. Michał Parniak

Centrum Optycznych Technologii Kwantowych, Centrum Nowych Technologii,
Uniwersytet Warszawski

tel. +48 225543786

email: m.parniak@cent.uw.edu.pl

POWIĄZANE STRONY WWW:

<https://www.fuw.edu.pl>

Strona Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

<https://www.fuw.edu.pl/press-releases.html>

Serwis prasowy Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

<https://www.qodl.eu/>

Strona laboratorium Urządzeń Kwantowo-Optycznych

<http://qot.cent.uw.edu.pl/>

Strona Centrum Optycznych Technologii Kwantowych QOT UW