

KWANTOWE TECHNOLOGIE KOSMICZNE. NAUKOWY WYMIAR POSTĘPU

"Większość z nas każdego dnia korzysta z co najmniej jednej kwantowej technologii kosmicznej - zegarów atomowych, zainstalowanych na satelitach systemów nawigacyjnych, takich jak GPS i Galileo" - pisze dr Jakub Mielczarek, badacz zjawisk kwantowych pracujący na Uniwersytecie Jagiellońskim oraz w Centrum Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu w Marsylii. W swojej publikacji na portalu Space24.pl autor prezentuje zwięzły przegląd głównych możliwości naukowo-technicznych, jakie rodzą się na styku mechaniki kwantowej i inżynierii kosmicznej wraz z postępem kolejnych zaawansowanych eksperymentów i badań.

Zegary, sensory i metrologia kwantowa

Zastosowanie zjawisk kwantowych w branży kosmicznej nie jest czymś nowym. Jednakże, ostatnie lata przyniosły szereg nowych obiecujących wyników, które pozwalają spojrzeć na wykorzystanie kwantowej natury światła i materii w warunkach kosmicznych w dużo szerszym kontekście.

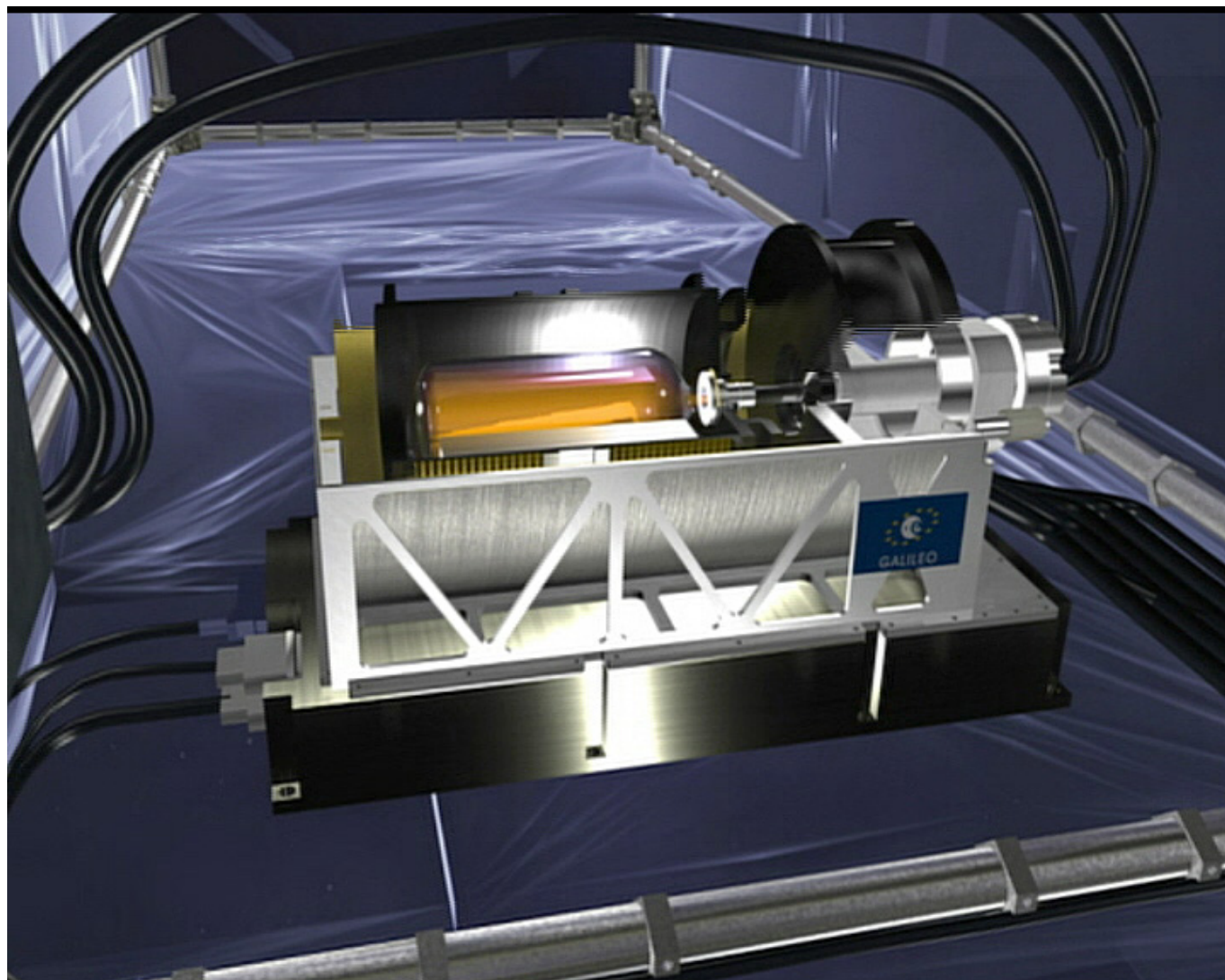
Zegary atomowe są najpowszechniejszym przykładem technologii kwantowych wykorzystywanych w warunkach kosmicznych. W szczególności, satelity europejskiego systemu Galileo pracują w oparciu o zarówno tradycyjne zegary rubidowe, jak i bardziej precyzyjne pasywne masery wodorowe (odpowiedniki laserów działające w zakresie mikrofal). W przypadku zegara wodorowego wykorzystywane jest, szczególnie dobrze znane wszystkim astronomom, przejście kwantowe pomiędzy poziomami w strukturze nadsubtelnej wodoru, czyli osławiona linia neutralnego wodoru 21 cm, której odpowiada częstotliwość około 1,420 GHz (co można wyprowadzić na gruncie mechaniki kwantowej).

Charakteryzując tę linię widmową okres oscylacji fali elektromagnetycznej równy jest więc 0.704 ns, a osiągnięta dokładność pracy takiego zegara to około 0.45 ns na 12h pracy zegara [1]. Niezwykle dokładny pomiar czasu z wykorzystaniem maserów wodorowych przekłada się na większą precyzję pozycjonowania systemu Galileo (sięgający 10 cm promień błędu w ramach Galileo High Accuracy Service), względem konkurencyjnych systemów GPS, Beidou i GLONASS. Warto dodać, że precyzyjne pomiary czasu mają ogromne znaczenie nie tylko dla nawigacji naziemnej, ale również dla nawigacji statków kosmicznych.

Czytaj też: [Polacy opracowali nowatorską metodę kwantowego sterowania fotonami](#)

Kolejnego, jednak już nieco mniej oczywistego przykładu zastosowania układu kwantowego w warunkach kosmicznych dostarczają kondensaty Bosego-Einsteina. W rozpatrywanej konfiguracji materii bozonowe stopnie swobody (cząstki o spinie całkowitym) makroskopowo obsadzają ten sam stan podstawowy (stan o najniższej energii). W konsekwencji, gęstość prawdopodobieństwa

poszczególnych cząstek (związana z ich funkcją falową) nabiera interpretacji koncentracji materii w kondensacie i może być poddawana analizie optycznej. Własność ta znajduje zastosowanie m.in. przy budowie interferometrów atomowych, które okazują się być niezwykle wrażliwe na zmiany natężenia pola grawitacyjnego. Opierające swoje działanie na kondensatach Bosego-Einsteina *grawimetry* doczekały się już wdrożeń komercyjnych, a ich czułość sięga poniżej $10^{-9} g$ [2] (g jest przyspieszeniem grawitacyjnym na powierzchni Ziemi).



Grafika przedstawiająca pasywny maser wodorowy systemu Galileo. Ilustracja: ESA [esa.int]

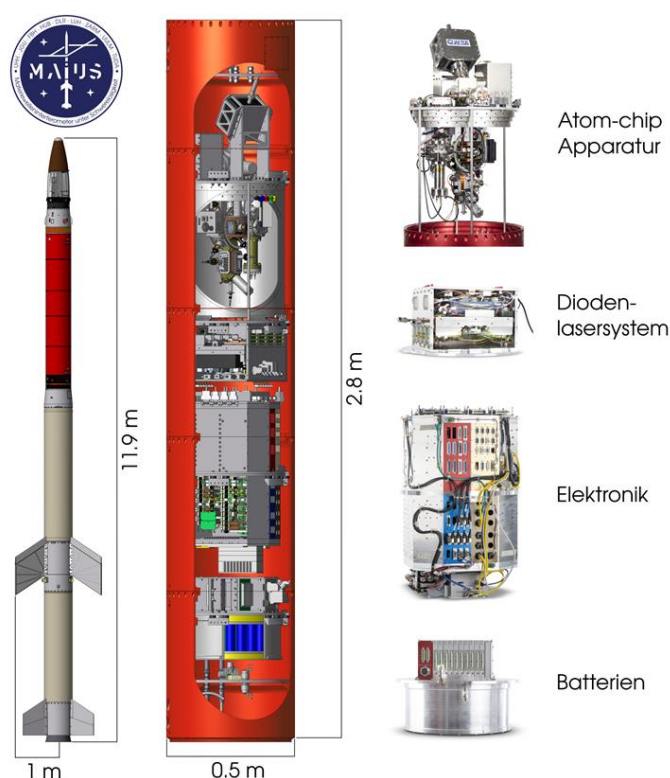
Wysoka wrażliwość interferometrów atomowych na zmiany pola grawitacyjnego wygenerowała zainteresowanie przeprowadzaniem eksperymentów w warunkach swobodnego spadku. Badania takie, motywowane zarówno możliwymi zastosowaniami praktycznymi jak i chęcią lepszego zrozumienia wpływu pola grawitacyjnego na układy kwantowe, zostały przeprowadzone m.in. we wieży swobodnego spadku w Bremie [3]. W 2017 roku udało się natomiast zrealizować pierwszą kosmiczną misję z wykorzystaniem kondensatu Bosego-Einsteina. Eksperyment ten przeprowadzono z pomocą rakiety MAIUS-1, wykonującej lot paraboliczny i osiągającej pułap około 243 km nad poziomem morza [4].

Powodzenie tej misji stanowi ważny krok w stronę grawimetrii satelitarnej opartej na wykorzystaniu kondensatów Bosego-Einsteina. Ma to również znaczenie w kontekście zrozumienia pewnych aspektów oddziaływania (klasycznego) pola grawitacyjnego na układy kwantowe. Warto również

podkreślić, że opracowane pod kątem eksperymentu rozwiązania inżynierskie będą mogły znaleźć szersze zastosowanie w ramach kwantowych technologii kosmicznych. Przeprowadzenie eksperymentu wiązało się bowiem z koniecznością dostosowania skomplikowanego układu doświadczalnego do wymogów stawianych przed technologiami kosmicznymi (m.in. odporność na wibracje i przeciążenia, ograniczenia na rozmiary układu). Było to zadanie tym trudniejsze, że wytworzenie kondensatu Bosego-Einsteina wymaga ochłodzenia materii do skrajnie niskich temperaturach, przyjmujących typowo wartości rzędu ułamków mikrokelwinów.

Czytaj też: [Przełom w komunikacji kwantowej?](#)

Z punktu widzenia badań podstawowych, interferometri atomowe oparte na kondensatach Bosego-Einsteina rozważane są również w kontekście budowy nowego typu naziemnych i kosmicznych detektorów fal grawitacyjnych [5]. Zanim jednak takie rozwiązania powstaną, własności mechaniki kwantowej zostaną wykorzystane w celu redukcji szumu w obecnie przygotowywanym przez ESA kosmicznym obserwatorium fal grawitacyjnych LISA. Już teraz, w celu obejścia problemu szumu śrutowego w naziemnych interferometrycznych obserwatoriach fal grawitacyjnych stosuje się tak zwane ściśnięte stany kwantowe światła [6]. Podejście to jest przykładem metrologii kwantowej, wdrożonej już w warunkach ziemskich, a której implementacja w misjach satelitarnych pozostaje jedynie kwestią czasu.



Schemat misji MAIUS-1. Ilustracja: niemiecka agencja kosmiczna DLR [dlr.de]

Komunikacja kwantowa

Niewątpliwie, wzbudzającym największe emocje i oczekiwania kierunkiem rodzącym się na styku inżynierii kosmicznej i mechaniki kwantowej jest tak zwana łączność kwantowa [więcej na ten temat w osobnym tekście autora artykułu: [kwantowa łączność satelitarna](#)]. W istocie jest to wykorzystanie stanów kwantowych pojedynczych fotonów do przesyłania informacji. Ponieważ jednak

przepustowość, powstałych w ten sposób, tzw. kanałów kwantowych nie może konkurować z pojemnością dostępnych kanałów klasycznych, łącze kwantowe wykorzystywane jest jedynie do wymiany tak zwanego sekretne klucza (będącego ciągiem bitów). Klucz ten umożliwia zastosowanie silnych algorytmów klasycznej kryptografii symetrycznej (takich jak AES-256) dla danych przesyłanych drogą konwencjonalną. Podejście takie nosi nazwę kwantowej dystrybucji klucza (ang. quantum key distribution - QKD) i stanowi jeden z filarów kryptografii kwantowej. Zaletą takiego rozwiązania jest, wynikająca z zasad mechaniki kwantowej, teoretyczna niepodatność protokołów na ataki (w praktyce, istnieją jednak możliwości tzw. ataków fizycznych wykorzystujących niedoskonałości urządzeń kryptograficznych).

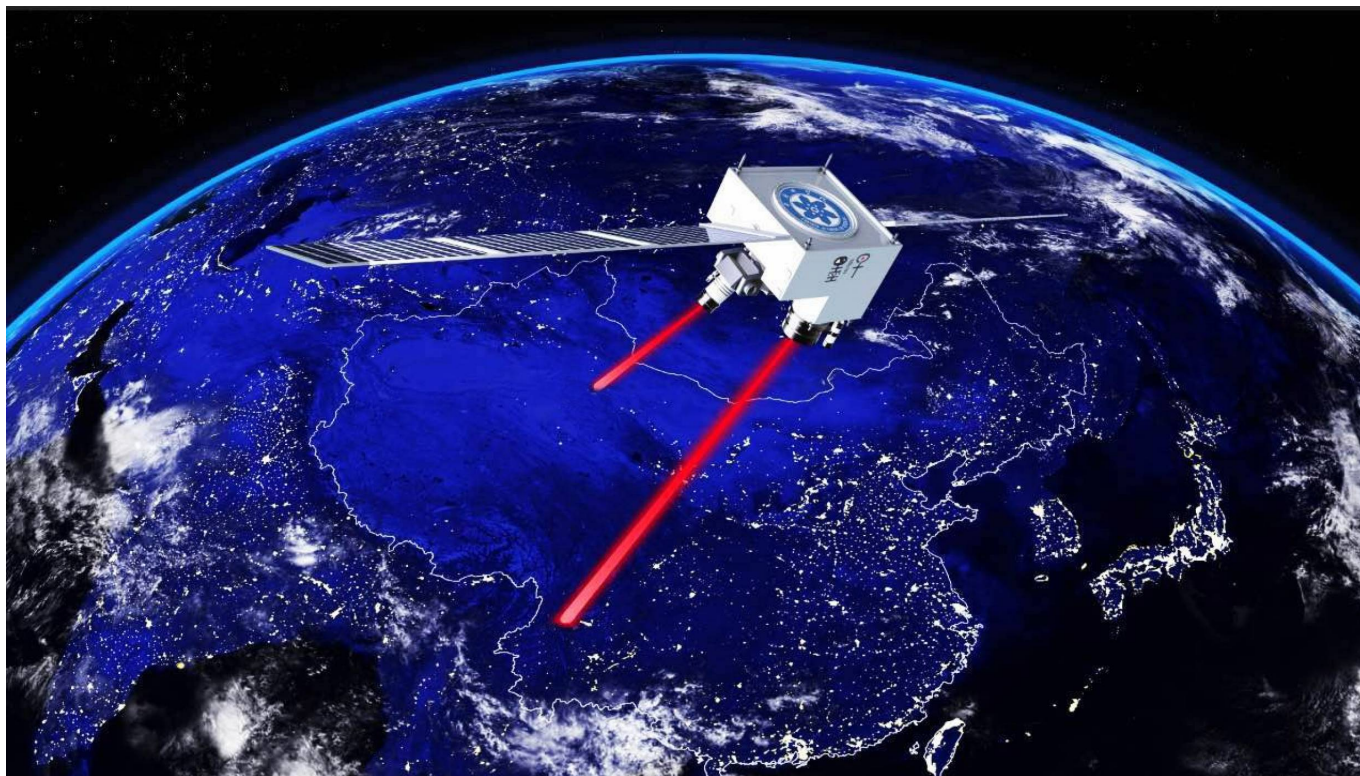
Z uwagi na eksponencjalne tłumienie sygnału kwantowego w światłowodach, wykorzystanie przestrzeni kosmicznej daje obecnie jedyną możliwość przeprowadzenia kwantowej dystrybucji klucza na odległościach kilkuset i kilku tysięcy kilometrów. Pierwszej tego typu międzykontynentalnej kwantowej transmisji satelitarnej dokonano w 2017 roku z wykorzystaniem chińskiego satelity Micius [7].

Czytaj też: [Chiny pionierem satelitarnej komunikacji kwantowej](#)

Rozwiązania satelitarne w skali satelity Micius są niezwykle skomplikowane i kosztowne. Aby więc, przy ograniczonych zasobach, przyspieszyć prace nad satelitarną komunikacją kwantową, grupy badawcze skłaniają się obecnie do dużo tańszych rozwiązań nanosatelitarnych, w szczególności, w standardzie CubeSat (podstawowa jednostka 1U = 10 cm x 10 cm x 10 cm). Eksperymenty te mają zarówno na celu przetestowanie pracy systemów optyki kwantowej w warunkach kosmicznych jak również samą łączność kwantową pomiędzy satelitą z stacją naziemną.

Do kategorii misji testujących jedynie układy optyczne (bez łączności) można zaliczyć nanosatelitę Galassia (2U) [8], za pomocą której w 2015 roku przeprowadzono testy systemu Spontaneous Parametric DownConversion (SPDC), wytwarzającego splątane stany kwantowe mogące znaleźć zastosowanie w np. protokole Ekerta E91. Kierunek ten jest rozwijany obecnie ramach nanosatelity SpooQySat (3U) [9]. Do misji CubeSatowych mających na celu przetestowanie łączności kwantowej możemy natomiast zaliczyć proponowane projekty takie jak Nanobob (12U) [10] i Q3Sat (3U) [11]. Są one zaprojektowane w konfiguracji uplink.

Ich konstrukcja nie wymaga więc instalowania systemu do przygotowywania stanów kwantowych a jedynie prostszy układ detekcyjny. Z drugiej strony jednak, rozwiązanie takie jest mniej korzystne z punktu widzenia czynnika atmosferycznego. Mianowicie, w przypadku konfiguracji downlink, turbulencje atmosferyczne wpływają na kierunek propagacji fotonów dopiero na końcowym etapie ich drogi, powodując jedynie nieznaczne poszerzenie wiązki. Natomiast, w przypadku konfiguracji uplink, kierunek propagacji fotonów jest najpierw zaburzony przez czynnik atmosferyczny, po czym dewiacja od wyjściowej osi optycznej narasta w trakcie jego dalszej propagacji. Dlatego też zarejestrowanie fotonu wymagać będzie większej średnicy zwierciadła.



Ilustracja: Chińska Akademia Nauk [cas.cn]

Ciekawym wynikiem w kontekście komunikacji kwantowej było niedawne wykorzystanie retroreflektora zainstalowanego na jednym z satelitów należących do systemu GLONASS do odbicia pojedynczych fotonów [12]. Wyniki tego eksperymentu rodzą nadzieję na przyszłe wykorzystanie pasywnych układów optycznych umieszczonych na satelitach do prowadzenia komunikacji kwantowej. Pozwoliłoby to znacznie uprościć konstrukcję i obniżyć koszty satelitów do kwantowej dystrybucji klucza, przenosząc środek ciężkości złożoności technologicznej takich systemów na powierzchnię Ziemi.

Warto zaznaczyć, że komunikacja kwantowa z uwagi na wykorzystanie światła laserowego wpisuje się również w kierunek komunikacji laserowej, dostarczającej w przypadku łączności klasycznej dużo większych przepustowości niż łączność radiowa (co jest prostą konsekwencją mniejszej długości fali). Obszar ten jest obecnie rozwijany w Europie w ramach projektu ESA ARTES ScyLight. Ponadto, postęp w kwantowej łączności satelitarnej (kluczowej to urzeczywistnienia koncepcji tzw. Internetu kwantowego) oraz metrologii kwantowej jest obecnie wspierany m.in. w ramach programu flagowego Komisji Europejskiej Quantum Flagship.

Teleportacja kwantowa i efekty relatywistyczne

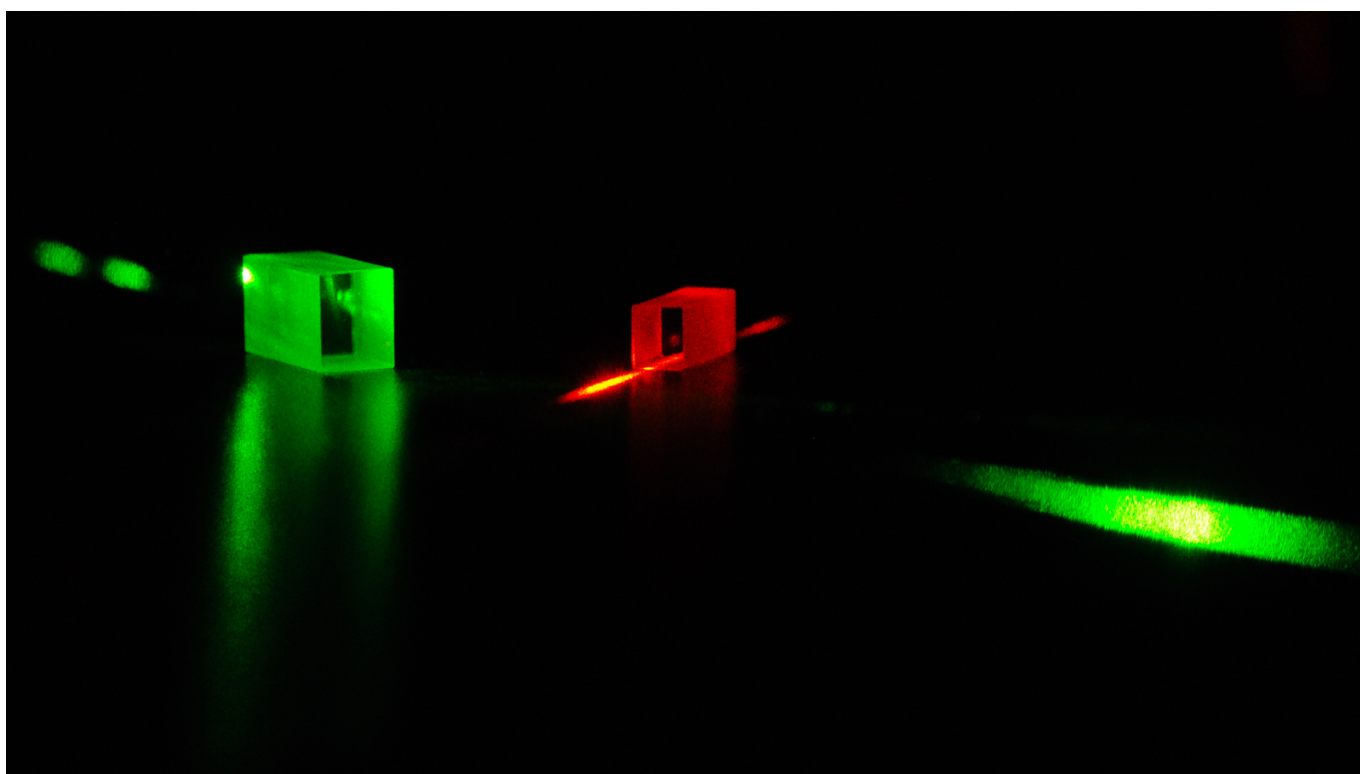
Nie można utworzyć idealnej kopii (klonu) nieznanego stanu kwantowego, co stanowi fundament bezpieczeństwa komunikacji kwantowej. Możliwe jest natomiast dokonanie jego kwantowej teleportacji (przesłania stanu kwantowego z prędkością światła), wykorzystując połączenie kanału kwantowego oraz klasycznego. Teleportacja kwantowa stanowi bardzo ważny element systemów przesyłania i przetwarzania informacji kwantowej.

Czytaj też: [Rewolucja kwantowa coraz bliżej](#)

Jej eksperymentalnego potwierdzenia dokonano po raz pierwszy w 1997 roku [13]. Po 20 latach od tego przełomowego momentu, w 2017 roku, przeprowadzono pierwszą teleportację stanu kwantowych fotonu z powierzchni Ziemi na niską orbitę okołozemską [14]. W ramach tego eksperymentu dokonano teleportacji sześciu różnych typów stanów kwantowych fotonu. W każdym z przypadków zaobserwowano poziom wierności (ang. fidelity) przesłanych stanów przekraczający wartość dla najlepszej strategii klasycznej, co potwierdza realność przeprowadzonego protokołu teleportacji.

Jak już wcześniej zaznaczono, wykorzystanie zjawisk kwantowych w warunkach kosmicznych dostarcza zarówno narzędzi do badania zjawisk grawitacyjnych (np. detekcja fal grawitacyjnych), jak również pozwala empirycznie eksplorować pewien obszar oddziaływania (klasycznego) pola grawitacyjnego na układy kwantowe. Dotyczy to, przede wszystkim, wpływu pola grawitacyjnego na ewolucję układów kwantowych. Okazuje się, że efekty związane z geometrią czasoprzestrzeni mogą mieć niezaniebdywalny wpływ na zachowanie układów kwantowych w pobliżu Ziemi.

Rozważania te, w szczególności, dotyczą kwantowej teorii pola na przestrzeniach zakrzywionych. Teorię tę stosujemy głównie do opisu promieniowania czarnych dziur oraz pierwotnych zaburzeń kosmologicznych, jednakże kwantową teorię pola na przestrzeniach zakrzywionych możemy wykorzystać również do opisu paczek falowych fotonów wykorzystywanych w komunikacji kwantowej. Co więcej, bardzo dobre przybliżenie geometrii czasoprzestrzennej w pobliżu Ziemi dostarcza metryka Schwarzschilda, opisująca nierotujące czarne dziury (w przypadku Ziemi, promień Schwarzschilda wynosi ok. 9 mm).



Układ laserów i kryształów używanych przy eksperymencie kwantowej teleportacji. Fot. Félix Bussières/University of Geneva via NASA Jet Propulsion Lab [jpl.nasa.gov]

Wykorzystując tę metrykę można np. przewidzieć poziom szumu w kanale kwantowym wynikający z grawitacyjnego przesunięcia ku czerwieni. Co ciekawe, wartość skumulowanego efektu relatywistycznego (grawitacyjne przesunięcie ku czerwieni plus relatywistyczny efekt Dopplera) może prowadzić do błędów w komunikacji kwantowej sięgających $\sim 1\%$ [15]. Taki wkład nie będzie mógł

zostać pominięty przy planowaniu przyszłych satelitarnych systemów do kwantowej dystrybucji klucza, podobnie jak uwzględnienie efektów relatywistycznych jest dzisiaj niezbędne do osiągnięcia odpowiednio wysokiej precyzji systemów nawigacji satelitarnej.

Podsumowanie

Kwantowe technologie coraz odważniej wkraczają w świat branży kosmicznej, skutkując kształtowaniem się nowej fascynującej dziedziny - kwantowych technologii kosmicznych. Jako główne praktyczne zastosowania tego kierunku rozwojowego rysują się obecnie: precyzyjne pomiary czasu (nawigacja), pomiary grawimetryczne oraz komunikacja kwantowa. Ponadto kosmiczne technologie kwantowe dostarczają narzędzi do prowadzenia nowych eksperymentów w zakresie badań podstawowych takich jak detekcja fal grawitacyjnych i wpływ pola grawitacyjnego na zjawiska kwantowe.

Szczególnie interesująca jest możliwość urzeczywistnienia wizji satelitarnego Internetu kwantowego, który dostarczyłby niepodatnego na kryptoanalizę sposobu wymiany szczególnie wrażliwych informacji. Wprowadzenie takiego rozwiązania stanowiłoby odpowiedź na obecne i przyszłe zapotrzebowanie zarówno cywilne, jak i wojskowe. Na drodze do osiągnięcia tego celu stoi wiele wyzwań, zarówno natury technicznej, jak i organizacyjnej (m.in. związanej z finansowaniem tak ambitnych przedsięwzięć). Należy być również świadomym ograniczeń takiego systemu, m.in. wynikających z możliwości zakłócenia jego pracy zarówno poprzez naturalne czynniki atmosferyczne, jak i wywołane celowo, sztuczne zakłócenia.

Czytaj też: [Przedstawiciel Creotech Instruments wśród doradców europejskiego programu kwantowego](#)

Warto na koniec zaznaczyć, że warunki kosmiczne stanowią całkiem dogodne środowisko dla systemów kwantowych. Próżnia kosmiczna dostarcza mianowicie odpowiednią izolację układów kwantowych przed niepożądanym wpływem środowiska (które prowadzi do tzw. dekoherencji układów kwantowych). Wiązki fotonów mogą zaś bez przeszkód propagować informację kwantową poprzez przestrzeń kosmiczną. Stwarza to nadzieję na rozwój kwantowych technologii kosmicznych, nie tylko w najbliższym otoczeniu Ziemi, ale również w bardziej odległych obszarach.

Z teoretycznego punktu widzenia dopuszczalne jest "rozpięcie" kanału kwantowego, chociażby pomiędzy Ziemią (lub orbitą okołoziemską) a Księżycem. Pozwoliłoby to m.in. na pobieranie informacji kwantowej bezpośrednio ze zlokalizowanych na Księżycu sensorów kwantowych i przetwarzanie informacji kwantowej bez konieczności jej "tłumaczenia" na informację klasyczną. Jednym z zastosowań takiego rozwiązania mogłaby być budowa kosmicznych interferometrycznych teleskopów optycznych, wykorzystujących teleportację stanów kwantowych światła [16]. Otrzymana syntetyczna apertura takich teleskopów byłaby nieporównywalna z jakąkolwiek istniejącą obecnie, dając możliwość prowadzenia obserwacji optycznych z niespotykaną rozdzielczością kątową. To oczywiście wciąż jedynie śmiałe pomysły, dopuszczalne jednak przez fizykę i nie aż tak odległe z technicznego punktu widzenia. To, czy kiedykolwiek się urzeczywistnią, zależy od nas.

Przypisy:

[1] https://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Galileo_s_clocks

[2] V. Menoret et al., [Gravity measurements below 10–9 g with a transportable absolute quantum gravimeter](#), Scientific Reports **8**, Article number: 12300 (2018)

- [3] H. Müntinga et al., Interferometry with Bose-Einstein Condensates in Microgravity, Phys. Rev. Lett. **110** (2013) no.9, 093602 [[arXiv:1301.5883](#)]
- [4] D. Becker et al., Space-borne Bose-Einstein condensation for precision interferometry, Nature **562**, 391–395 (2018) [[arXiv:1806.06679](#)]
- [5] S. Dimopoulos, P. W. Graham, J. M. Hogan, M. A. Kasevich and S. Rajendran, Gravitational Wave Detection with Atom Interferometry, Phys. Lett. B **678** (2009) 37 [[arXiv:0712.1250](#)]
- [6] LIGO Scientific Collaboration, Enhanced sensitivity of the LIGO gravitational wave detector by using squeezed states of light, Nature Photonics **7**, 613–619 (2013) [[arXiv:1310.0383](#)]
- [7] Sheng-Kai Liao, et al., Satellite-relayed intercontinental quantum network, Phys. Rev. Lett. **120**, 030501 (2018) [[arXiv:1801.04418](#)]
- [8] Z. Tang, et al., Generation and Analysis of Correlated Pairs of Photons aboard a Nanosatellite, Phys. Rev. Applied **5** (2016) no.5, 054022 [[arXiv:1603.06659](#)]
- [9] R. Bedington et al., [Nanosatellite experiments to enable future space-based QKD missions](#), EPJ Quantum Technology 2016 **3**:12
- [10] E. Kerstel et al., Nanobob: a CubeSat mission concept for quantum communication experiments in an uplink configuration, EPJ Quantum Technology **5**, Article number: 6 (2018) [[arXiv:1711.01886](#)]
- [11] S. P. Neumann et al., Q3Sat: quantum communications uplink to a 3U CubeSat—feasibility & design, EPJ Quantum Technol. (2018) **5**: 4 [[arXiv:1711.03409](#)]
- [12] L. Carderaro et al., Towards Quantum Communication from Global Navigation Satellite System, Quantum Sci. Technol. **4**, 015012 (2019) [[arXiv:1804.05022](#)].
- [13] D. Bouwmeester et al., Experimental quantum teleportation, Nature **390**, 575–579 (1997) [[arXiv:1901.11004](#)]
- [14] J-G Ren et al., Ground-to-satellite quantum teleportation, Nature **549**, 70–73 (07 September 2017) [[arXiv:1707.00934](#)]
- [15] D. E. Bruschi, T. Ralph, I. Fuentes, T. Jennewein and M. Razavi, Spacetime effects on satellite-based quantum communications, Phys. Rev. D **90** (2014) no.4, 045041. [[arXiv:1309.3088](#)]
- [16] E. Khabiboulline et al., Quantum-Assisted Telescope Arrays [[arXiv:1809.03396](#)]

Autor: Dr Jakub Mielczarek - pracuje w Instytucie Fizyki na Uniwersytecie Jagiellońskim oraz w Centrum Fizyki Teoretycznej na Uniwersytecie w Marsylii. W latach 2016-2018 Prezes Zarządu Spółki Space Garden, odpowiedzialnej m.in. za utworzenie Habitatu Lunares w Pile. Jest kierownikiem zespołu naukowego Quantum Cosmos Lab ([quantumcosmos.org](#)), w ramach którego prowadzone są badania teoretyczne na styku teorii grawitacji i mechaniki kwantowej. Jednym z obszarów aktywności zespołu jest rozwijanie teoretycznych podstaw kwantowej komunikacji satelitarnej.