

SPLĄTANIE KWANTOWE Z POZIOMU NANOSATELITY. NOWY ROZDZIAŁ BADAŃ

Pierwsze eksperymenty satelitarne z wykorzystaniem splątanych stanów fotonów to kwestia zaledwie kilku minionych lat. Początek dał test z użyciem chińskiego satelity średniego typu o nazwie Micius, którego umieszczono na orbicie w sierpniu 2016 roku. W ostatnim czasie natomiast udało się zrealizować kolejny ważny krok w kierunku wykorzystania przestrzeni kosmicznej do prowadzenia komunikacji kwantowej oraz do badań nad zjawiskami kwantowymi w warunkach mikrogravitacji - doświadczenie z użyciem miniaturowego satelity.

Najnowszy eksperyment orbitalny ze splątanymi stanami kwantowymi fotonów przeprowadzono z wykorzystaniem miniaturowego satelity typu CubeSat (w standardzie tym, 1U odpowiada sześcienniej konstrukcji o długości krawędzi równej 10 cm), SpooQy-1. Nanosatelita zbudowany został z trzech jednostek (3U), przy czym systemy sterowania, łączności i zasilania zamknięto w jednej (1U). Pozostałe dwa bloki zajęło oprzyrządowanie samego eksperymentu kwantowego.

Misja została przeprowadzona przez Centrum Technologii Kwantowych w Singapurze, we współpracy z partnerami ze Szwajcarii, Australii i Wielkiej Brytanii. SpooQy-1 powstał na bazie wcześniejszego projektu nanosatelitarnego Galassia (2U), który w 2016 roku wykonał orbitalne testy układu do generowania splątanych stanów kwantowych [1]. W ramach tej misji nie udało się jednak dokonać pomiarów samego splątania kwantowego.

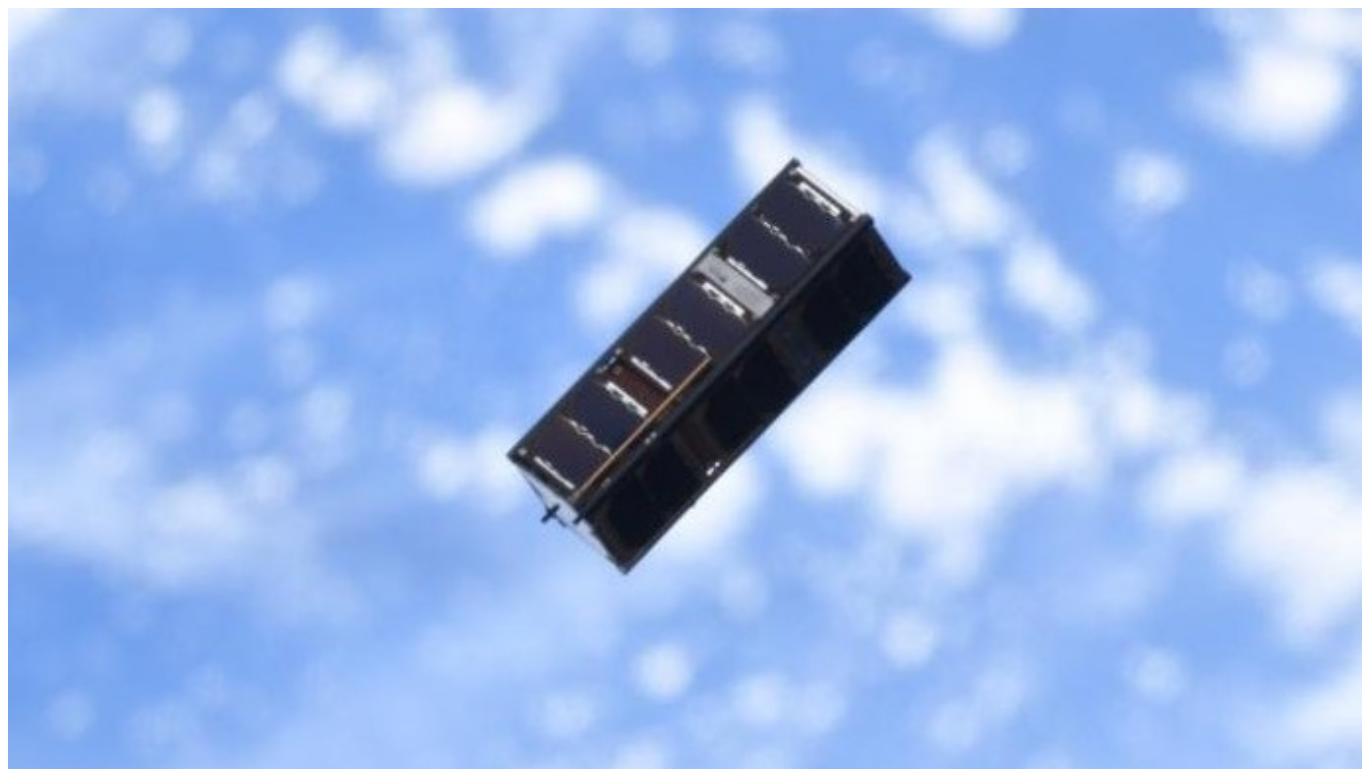
Z uwagi na stosunkowo niskie koszty zarówno budowy, jak i umieszczania na niskiej orbicie okołoziemskiej CubeSatów, przeprowadzona misja toruje drogę do powszechniejszej realizacji satelitarnych projektów kwantowych. Ich prowadzenie i dalsze rozwijanie pojawia się w zasięgu coraz mniejszych grup naukowców i inżynierów z różnych ośrodków oraz części świata.

Fizyka u podstaw technologicznego przeskoku

Żeby odpowiednio unaocznić znaczenie eksperymentu przeprowadzonego na pokładzie nanosatelity SpooQy-1, warto przypomnieć najpierw, co rozumiemy przez splątanie kwantowe. Fotony - jako podstawowe porcje (kwanty) pola elektromagnetycznego - oprócz odpowiadającej im długości fali, czy też zbioru długości fali składających się na tak zwaną paczkę falową, posiadają również dwa wewnętrzne stopnie swobody związane z ich polaryzacją. Wypadkowa polaryzacja fotonu ma postać kwantowej superpozycji dwóch stanów bazowych polaryzacji. Jako stany bazowe możemy wybrać przykładowo dwie prostopadłe względem siebie polaryzacje: poziomą (H - horizontal) oraz pionową (V - vertical). Kierunki polaryzacji są ustalone względem referencyjnego układu odniesienia - takiego, jaki wyznacza chociażby płaszczyzna stołu optycznego.

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

Fotony możemy przygotować w stanach o pożądanej polaryzacji liniowej, przepuszczając je przez polaryzator. Jeśli będzie on ustawiony np. w pozycji H, to foton o początkowej dowolnej polaryzacji, po przejściu przez taki polaryzator znajdzie się w stanie H. Ciekawą sytuacją jest, kiedy pozycja polaryzatora nie będzie pokrywała się z jedną z pozycji bazowych H i V, lecz np. będzie względem każdej z nich obrócona o 45 stopni - odpowiada to wówczas polaryzacji diagonalnej (D - diagonal) oraz antydiagonalnej (A - anti-diagonal).



Nanosatelita SpooQy-1 krótko po opuszczeniu Międzynarodowej Stacji Kosmicznej. Fot. NASA [nasa.gov]

Wtedy to, analizując np. foton w stanie o polaryzacji D za pomocą analizatora złożonego z polaryzatorów ustawionych w pozycjach H i V, zaobserwujemy tak zwaną redukcję stanu kwantowego. Statystycznie, przepuszczając przez analizator pewną licznę fotonów przygotowanych w stanie D, połowę z nich zarejestrujemy jako będące w stanie H, a połowę w stanie V. Stan o polaryzacji D możemy więc uznać za superpozycję kwantową stanów bazowych H i V, z jednakowym rozkładem prawdopodobieństw równym $1/2$. W trakcie aktu pomiaru, jakim jest analiza polaryzacji, stan ten redukuje się do jednego ze stanów bazowych (H,V) i pozostaje w nim.

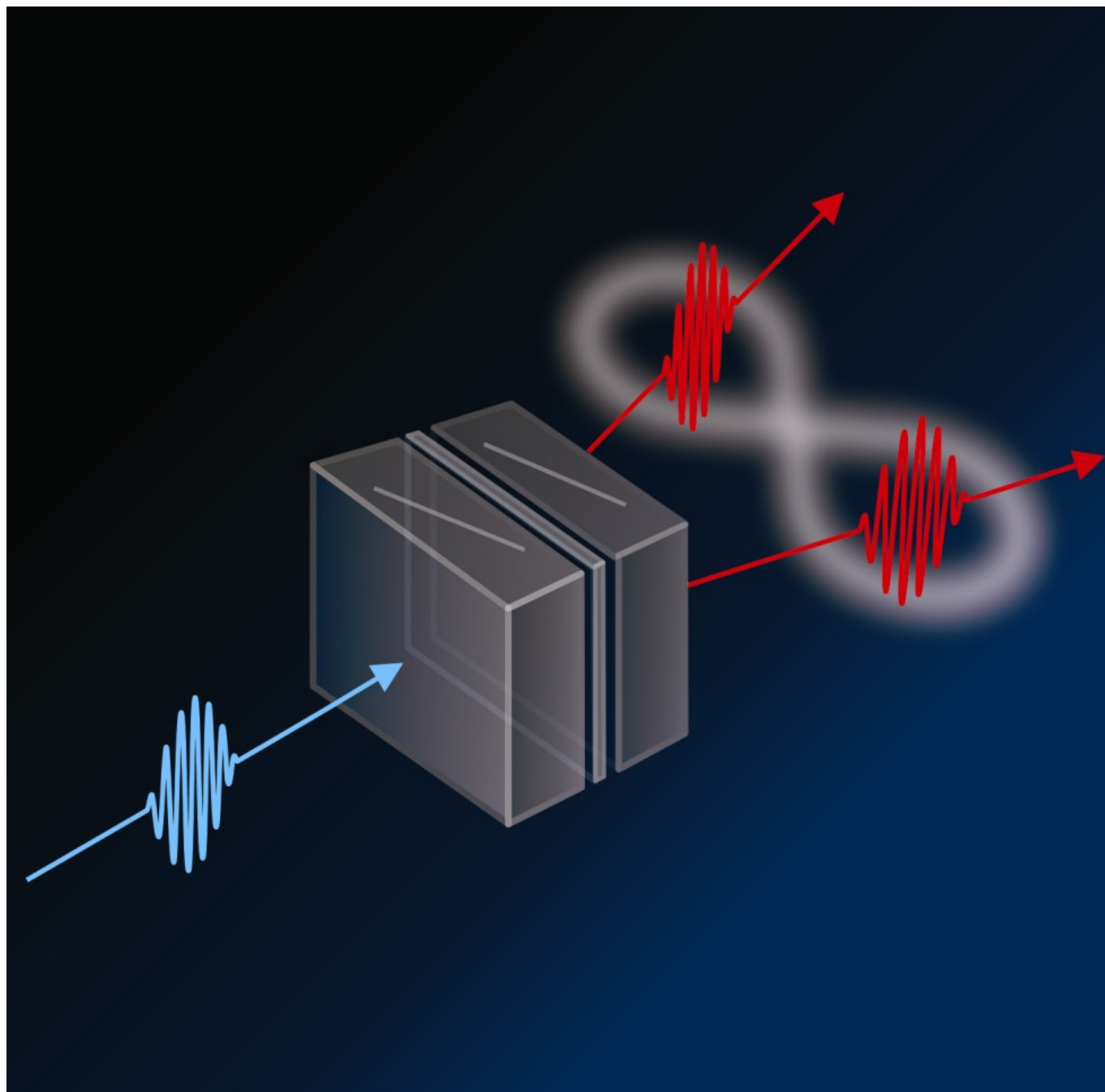
Mówiąc o koncepcji superpozycji kwantowej w kontekście splątania kwantowego, punktem odniesienia dla dalszych rozważań są stany kwantowe dwóch fotonów. Takie też stany wygenerowane zostały w ramach misji SpooQy-1. Jest to zresztą sytuacja najpowszechniejsza, gdyż wytwarzanie stanów splątanych trzech i większej liczby fotonów to wciąż raczkujący obszar doświadczalnej optyki kwantowej.

Czytaj też: [Komunikacja kwantowa dla Europy. Nowa jakość, którą mogą współtworzyć polskie firmy i uczelnie](#)

Zjawisko splątania kwantowego jest szczególnym typem superpozycji w układzie cząstek, prowadzące do występowania nielokalnych korelacji pomiędzy nimi. Stanami dwufotonowymi, w których możemy zaobserwować splątanie, są w szczególności stany Bella: $\Phi+$, $\Phi-$, $\Psi+$ i $\Psi-$. Stany te są szczególnie

interesujące, gdyż należą do przypadku, w którym splątanie kwantowe jest najsilniejsze (mówimy, że są to stany maksymalnie splątane).

Przyjrzyjmy się bliższej przypadkowi fotonów w stanie Φ^+ . Fotony takie, wyemitowane ze źródła stanu splątanego, propagują się następnie do odległych punktów A i B, w których następuje pomiar. Podobnie, jak w omawianym powyżej przypadku pojedynczego fotonu, odgórnie możemy z równym prawdopodobieństwem oczekiwać zarejestrowania każdego z fotonów w stanie o jednej z dwóch polaryzacji: H lub V.



Ilustracja: University of Science and Technology of China [ustc.edu.cn]

W tym momencie dochodzimy jednak do jednej z najbardziej enigmatycznych własności mechaniki kwantowej. Mianowicie, jeśli dokonamy analizy polaryzacji jednego z fotonów, to będzie to miało natychmiastowy wpływ na wynik pomiaru przeprowadzonego na tym drugim. Jeśli np. w wyniku pomiaru okaże się, że foton w punkcie A jest w stanie o polaryzacji H, to ze stuprocentową pewnością, analizując drugi foton w punkcie B, zaobserwujemy, że znajduje się on również w stanie H. Natomiast,

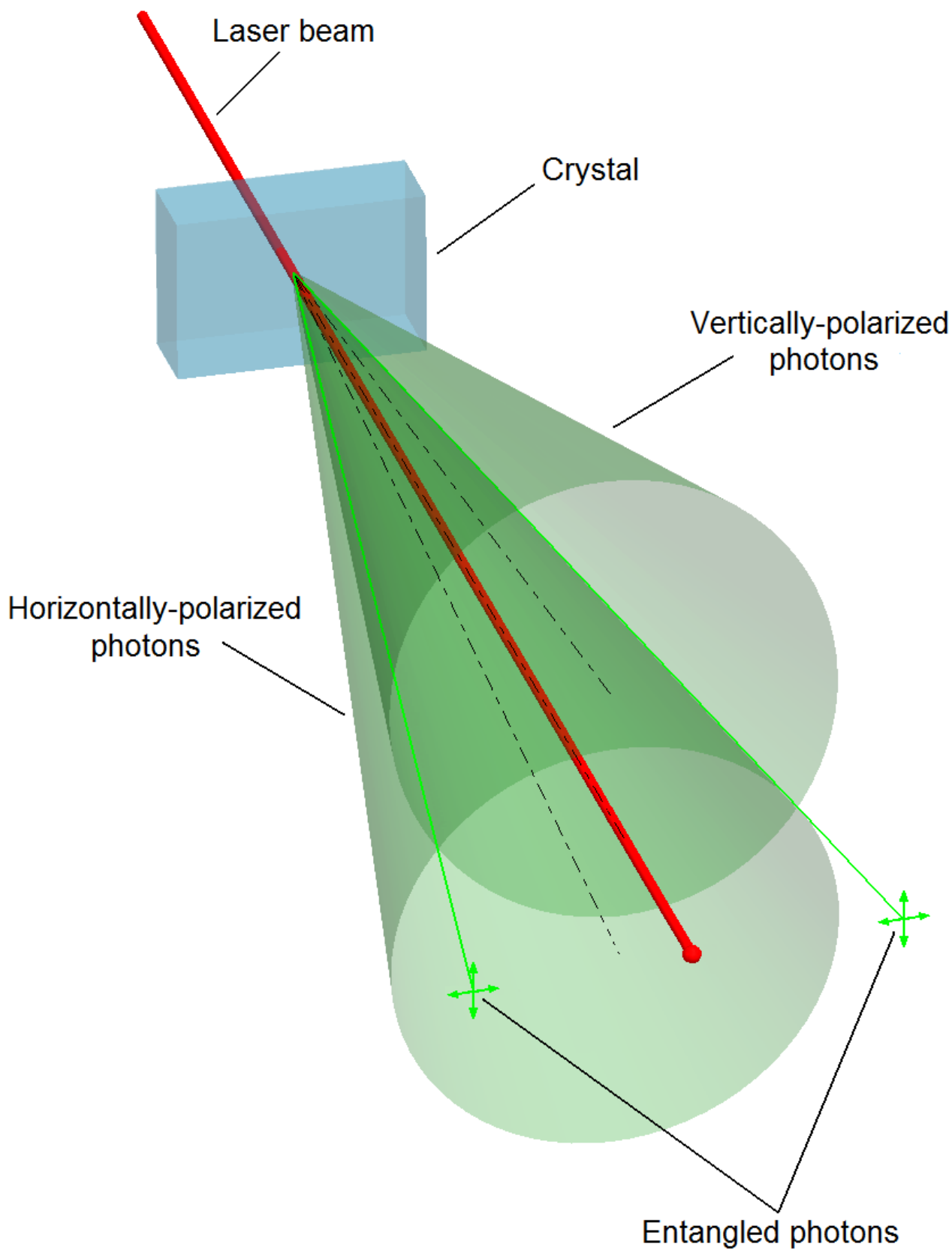
jeśli nie dokonaliśmy pomiaru w punkcie A, to wynik pomiaru w punkcie B wynosiłby w 50% przypadków H i w 50% przypadków V.

Czytaj też: [Badania kwantowe wśród jasnych punktów polsko-francuskiej kooperacji](#)

Ta natychmiastowa redukcja stanu kwantowego, odbiegająca od tak zwanego lokalnego realizmu, okazała się trudna do zaakceptowania przez wielu fizyków, co znalazło ucieleśnienie między innymi w paradoksie EPR (Einsteina-Podolskiego-Rosena). Przypuszczano, że mogą istnieć pewne dodatkowe (nieobserwowane) stopnie swobody, tak zwane zmienne ukryte, o których wiedza pozwoliłaby przewidzieć wyniki pomiarów i uniknąć konieczności natychmiastowej redukcji stanu kwantowego pomiędzy odległymi punktami. Możliwość występowania zmiennych ukrytych, przynajmniej tych lokalnego typu, wyeliminował ostatecznie w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku północnoirlandzki fizyk John Bell – ten sam, od którego nazwiska pochodzi wprowadzona powyżej rodzina stanów kwantowych.

Rozważając korelacje pomiędzy wynikami pomiarów w punktach A, B wykazał on, że hipoteza zmiennych ukrytych wymaga spełnienia określonej nierówności pomiędzy wynikami pomiarów w różnych bazach. Jak postulował Bell, teoria lokalnych zmiennych ukrytych wymaga, żeby wielkość zwana parametrem CHSH (Clauser-Horne-Shimony-Holt) – pod postacią: $S = E(a,b) - E(a,b') + E(a',b) + E(a',b')$ – spełniała następującą nierówność (zwana nierównością Bella, lub też nierównością Bella-CHSH): $|S| \leq 2$.

Zainteresowani szerszym wyjaśnieniem powyższego wątku teoretycznego mogą zapoznać się z nim w poszerzonej wersji artykułu - [zamieszczonego na autorskim blogu](#).



Ilustracja: Wikimedia Commons/J-Wiki [GNU Free Documentation License - domena publiczna]

Okazuje się jednak, że stany splątane, takie jak rozważane tu stany Bella, jawnie łamią tę nierówność, przecząc lokalnemu realizmowi. Wynik ten wspiera postrzeganie mechaniki kwantowej jako teorii w

pewnym stopniu nielokalnej. Mianowicie, stan splątany dwóch cząstek kwantowych traktujemy jako jeden obiekt kwantowy i niezależnie od tego, czy jedna jego część znajduje się w dużej odległości od drugiej, ingerencja w tą pierwszą poniesie za sobą natychmiastowy skutek dla tej drugiej i vice versa.

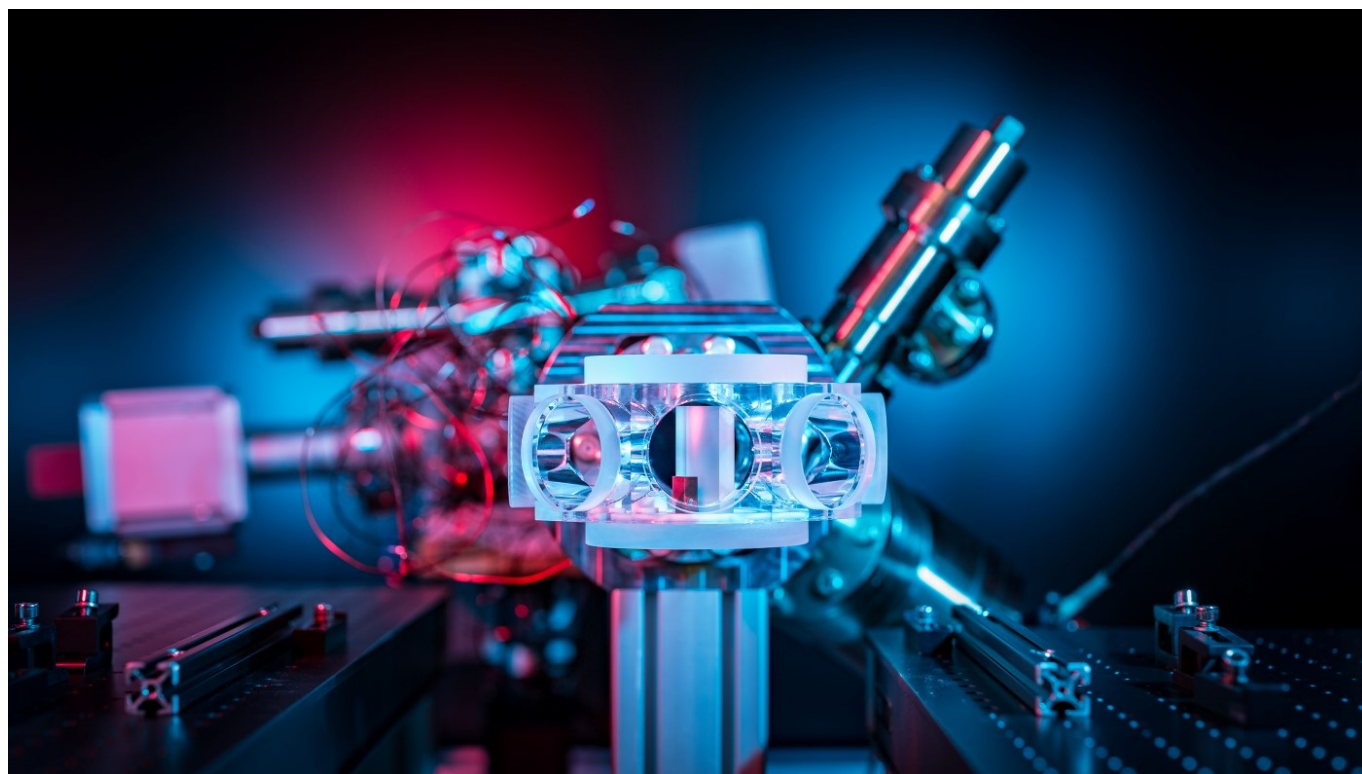
Czytaj też: [Coraz szersze partnerstwo na rzecz komunikacji kwantowej dla Europy](#)

Wbrew pierwotnym obawom, wyrażonym w paradoksie EPR, nie jest w ten sposób możliwa nadświetlna wymiana informacji. Pomimo, że splątanie kwantowe nie pozwala urzeczywistnić wizji znanych chociażby z sagi Star Trek, umożliwia zastosowanie w komunikacji – za sprawą zarówno możliwości przeprowadzania za jej pośrednictwem tak zwanej teleportacji stanów kwantowych, jak i kwantowej dystrybucji klucza. Oba te procesy zachodzą z prędkością światła w danym ośrodku, która jest mniejsza lub równa prędkości światła w próżni.

Nie takie znowu „upierne oddziaływanie na odległość”... czyli splątanie w praktyce

Kwantowa dystrybucja klucza, czyli drugie ze wskazanych zastosowań praktycznych zjawiska splątania kwantowego, stanowi jeden z filarów kryptografii kwantowej. Przyciąga szczególnie duże zainteresowanie inżynierijno-badawcze i stanowi jedną z głównych motywacji do przeprowadzenia misji takich jak SpooQy-1. Wytworzone w takich przypadkach stany Bella pozwalają m.in. na zastosowanie protokołu Ekerta (E91) kwantowej dystrybucji klucza [2].

W podejściu tym, zaufana jednostka (na przykład nanosatelita) wytwarza pary splątanych fotonów, wysyłając jeden z nich do punktu A, a drugi do punktu B. Analizując otrzymane fotony, można otrzymać ciągi wyników pomiaru polaryzacji, np. HVHHVHVHV.... Przypisując zaś stanom polaryzacji wartości binarne np. H->0 i V->1, otrzymujemy ciąg bitów 010010101..., który może stanowić sekretny klucz, stosowany w protokołach klasycznej kryptografii symetrycznej.



Fot. Instytut Optyki Kwantowej i Informacji Kwantowej Austriackiej Akademii Nauk-IQOQI ÖAW [iqoqi.at]

Przygotowując fotony np. w stanie $\Phi+$, mamy pewność, że jeśli odbiorca A zarejestrował ciąg 010010101..., to taki sam ciąg zaobserwuje również odbiorca klucza w punkcie B. Dodatkowym elementem takiego protokołu jest sprawdzenie na części odbieranych bitów tego, czy nie nastąpił podsłuch transmisji. Po pomyślnej weryfikacji, uzyskujemy wynikającą z praw mechaniki kwantowej gwarancję poufności wymienionego klucza.

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

Za pomocą satelity SpooQy-1 przeprowadzono testy zarówno wytwarzania, jak i analizy stanów splątanych. Splątane fotony nie były jednak emitowane poza nanosatelitę, do odbiorców w przestrzeni kosmicznej lub na powierzchni Ziemi. To już będzie stanowiło przedmiot kolejnych misji. W ramach tego projektu, cały eksperyment został przeprowadzony w obrębie zamkniętego modułu doświadczalnego, zawierającego źródło splątanych fotonów oraz ich analizator.

Do wytworzenia par splątanych kwantowo fotonów wykorzystano, powszechnie stosowany w warunkach laboratoryjnych, proces zwany spontanicznym parametrycznym obniżaniem częstości (SPDC – Spontaneous Parametric Down-Conversion). W zjawisku tym, wysokoenergetyczny (np. ultrafioletowy) foton ulega w optycznie nieliniowym ośrodku konwersji na dwa niżej-energetyczne fotony, występujące już w stanie splątanim. Wyniki przeprowadzonego eksperymentu raportują o wytworzeniu w ten sposób, w warunkach kosmicznych, stanu Bella $\Phi-$ (jest to stan bardzo podobny do stanu $\Phi+$, różniący się od niego jedynie względną fazą pomiędzy stanami bazowymi).

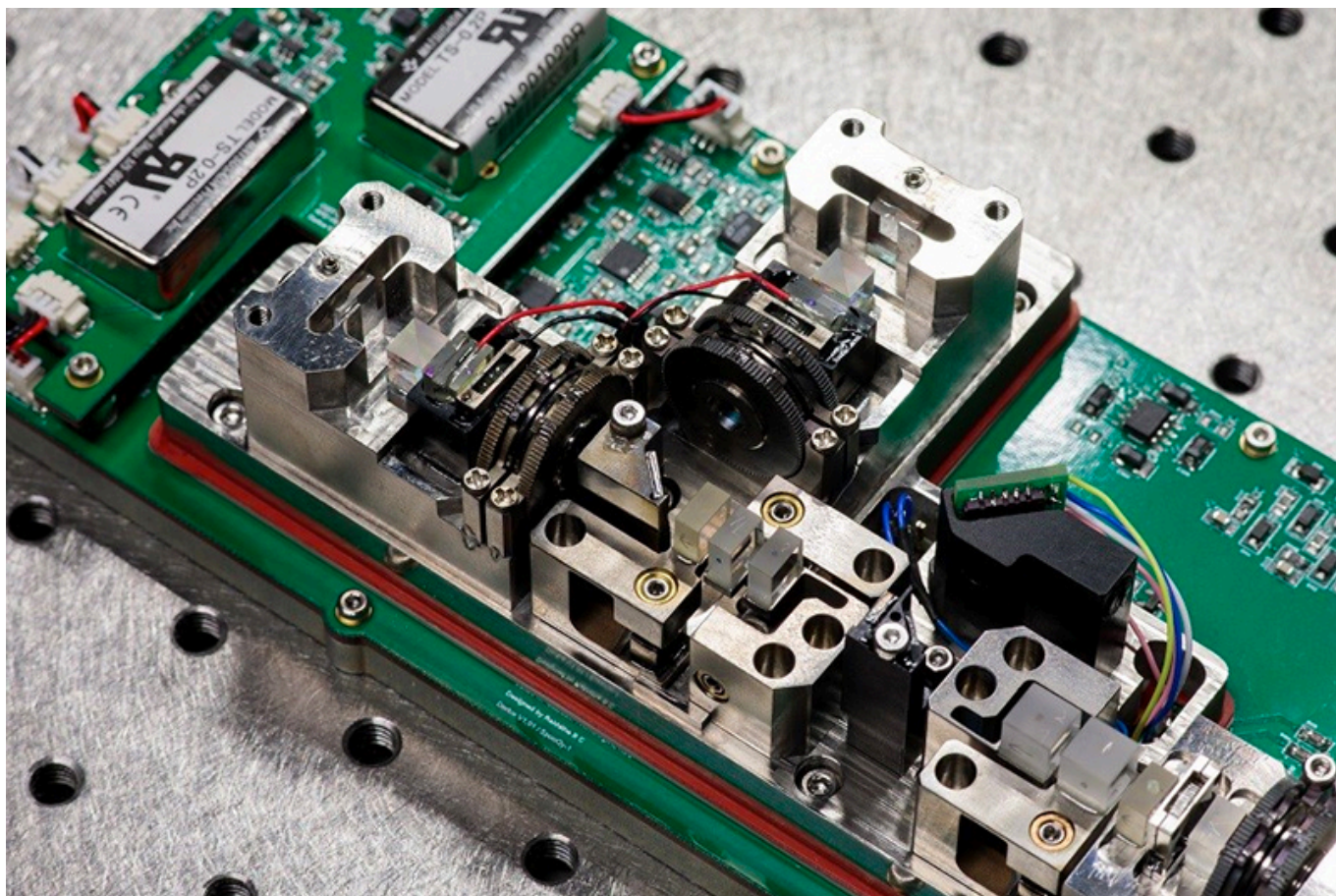
W układzie eksperymentalnym jako źródło fotonów zastosowano diodę laserową (LD), generującą wiązkę fotonów o długości fali 405 nm (granica światła widzialnego, w stronę bliskiego ultrafioletu) i szerokości spektralnej równej 160 MHz. Do wytworzenia stanów splątanych wykorzystano dwie płytki wykonane z boranu baru (BBO), pomiędzy którymi ustawiono płytkę półfalową (HWP), dokonującą obrotu polaryzacji o 90 stopni.

Czytaj też: [Chiński satelita do komunikacji kwantowej rozpoczął działalność operacyjną](#)

W celu usunięcia z wiązki wejściowego (pompującego) światła laserowego, które nie uległo konwersji w procesie SPDC, zastosowano lustro dichroiczne (DM1), pełniące funkcję filtru. Natomiast, aby skompensować dyspersję otrzymanych fotonów na drodze optycznej zastosowano kryształ wanadanu (V) itru – YVO4. Tak otrzymany sygnał został rozdzielony do dwóch analizatorów za pomocą kolejnego lustra dichroicznego (DM2). Każdy z nich składał się z ciekłokrystalicznego rotatora polaryzacji (LCPR), polaryzatora (P) oraz fotodiody lawinowej (GM-APD) i analizował jeden z fotonów należący do kwantowo splątanej pary. Zarejestrowane fotony uznawano za pochodzące z jednej splątanej kwantowo pary, jeśli zaobserwowano je w oknie czasowym o rozpiętości ~ 5 ns.

Doniosłe wnioski z misji niepozornego satelity

Za pomocą takiego układu doświadczalnego, przeprowadzono eksperyment, w którym wykazano, że wartość parametru S , dla wytworzonych w procesie SPDC stanów Bella przyjmuje wartości większe od klasycznej granicy $S=2$, a mniejsze od teoretycznie przewidzianej wartości równej $S=2\sqrt{2}\approx 2.83$. Uśredniona, otrzymana w ramach eksperymentu wartość to $S=2.60\pm 0.07 > 2$. Potwierdzono tym samym łamanie nierówności Bella w warunkach orbitalnych.



Zminiaturyzowane urządzenie wytwarzające pary splątanych fotonów na pokładzie CubeSata SpooQy-1. Fot. Centre for Quantum Technologies, National University of Singapore

Otrzymany w eksperymencie poziom błędów, odpowiadający parametrowi QBER (Quantum Bit Error Rate) równemu ~ 4 procent (około cztery na 100 transmitowanych bitów są błędne), jest wystarczający do tego, żeby pomyślnie przeprowadzać kwantową dystrybucję klucza. To wymagać będzie jednak dostosowania układu doświadczalnego do pracy z laserem o większej mocy i układem optycznym umożliwiającym dalekodystansową komunikację optyczną.

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

Przybliżone tu wyniki grupy z Centrum Technologii Kwantowych w Singapurze, którego dyrektorem do niedawna pozostawał Polak prof. Artur Ekert, to z jednej strony zwieńczenie wielu lat intensywnej pracy, a z drugiej preludeum do kolejnych, jeszcze szerzej zakrojonych, kwantowych projektów kosmicznych. Do następnych milowych kroków należą niewątpliwie: przeprowadzanie kwantowej dystrybucji klucza pomiędzy dwoma nanosatelitami [3] oraz pomiędzy nanosatelitą a stacją naziemną [4].

Prace w tym kierunku, w szczególności w kontekście wykorzystania łatwiejszej wersji kwantowej dystrybucji klucza, nie opartej na splątaniu kwantowym, już trwają. Ponadto, nanosatelitarne eksperymenty ze splątaniem kwantowym w warunkach orbitalnych otwierają możliwość do badań podstawowych, szczególnie w kontekście związku pomiędzy teorią grawitacji a fizyką kwantową.

Warte podkreślenia jest to, że dzięki wykorzystaniu platform typu CubeSat, projekty tego typu stają się możliwie do realizacji również w warunkach polskich. W kierunku tym zwracamy się ramach działającego na Uniwersytecie Jagiellońskim w Krakowie zespołu naukowego Quantum Cosmos Lab.

Przypisy:

- [1] Zhongkan Tang, et al., [Generation and Analysis of Correlated Pairs of Photons aboard a Nanosatellite](#), Phys. Rev. Applied **5**, 054022 (2016).
- [2] Artur K. Ekert, [Quantum cryptography based on Bell's theorem](#), Phys. Rev. Lett. **67**, 661 (1991).
- [3] Denis Naughton, et al., [Design considerations for an optical link supporting intersatellite quantum key distribution](#), Optical Engineering **58(1)**, 016106 (2019).
- [4] R. Bedington, et al., [Nanosatellite experiments to enable future space-based QKD missions](#), EPJ Quantum Technology 2016 **3**:12 (2016).
-

Autor: Dr hab. Jakub Mielczarek - pracownik naukowy w Instytucie Fizyki na Uniwersytecie Jagiellońskim. 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.