
Szkolenie atomów

Atomic drill

Jan Chwedeńczuk*

Instytut Fizyki Teoretycznej, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Abstrakt. Atomy, jak rekruci, by się sprawdzić na kwantowym polu bitwy, muszą przejść przysposobienie. Skoszarowane w pułapkach magnetycznych nabierają ogłady, zaś poddane mozolnemu szkoleniu, stają się najbardziej elitarną grupą w znanym Wszechświecie – nielokalnie splątany oddziałem do zadań specjalnych.

Słowa kluczowe: splątanie, zimne atomy, korelacje Bella, nielokalność, mechanika kwantowa

Abstract. Atoms, like recruits, to prove themselves on the quantum battlefield, must get some drill. Enclosed in magnetic traps they get familiar with each other, while, subjected to strenuous training, they become the most elite group in the known Universe – a non-locally entangled squad for special tasks.

Keywords: entanglement, cold atoms, Bell correlations, nonlocality, quantum mechanics

Analogia (gr. *ἀναλογία*) między różnymi rzeczami, zjawiskami, procesami itp. to ich podobieństwo lub odpowiedniość. Jeśli coś jest analogią czegoś innego, to jest do tego podobne i zajmuje to samo miejsce lub pełni tę samą funkcję w innej sytuacji lub w ramach innego systemu (Inny SJP PWN, 2000)

Wiosną tego roku dostałem propozycję, by w audycji radiowej filozofa i dziennikarza Tomasza Stawiszyńskiego opowiedzieć o niedawno opublikowanej pracy, której jestem współautorem. Sumiennie przygotowałem się do wystąpienia robiąc skrupulatne notatki. Mój zamiar był taki: zacznę od opisu chłodzenia i pułapkowania atomów, opowiem o znaczeniu oddziaływań dwuciałowych, o wielociałowych korelacjach Bella, a na końcu ewentualnie o ich mierzeniu, wszystko językiem w miarę potocznym. Skończyłoby się pewnie tak, że kilka dni po audycji znowu ktoś przysłałby podziękowanie: *dobrze się słuchało, ale ciężko było coś zrozumieć.*

Kiedy szedłem Łazienkami Królewskimi, w drodze do rozgłośni, przyszło mi na myśl, że całe to złożone zagadnienie jest w pewnym stopniu analogiczne do procesu szkolenia żołnierzy przekształcającego grupę „gołych” rekrutów w zgrany oddział. Już na antenie okazało się, że analogia jest zaskakująco „wydajna”, pozwala bowiem przedstawić słuchaczom fizyczne zagadnienie bez odwoływania się do złożonych pojęć mechaniki kwantowej. Oto jej zarys.

Cel jest prosty (w każdym razie łatwo go sformułować): należy zebrać parę tysięcy atomów i sprawić, by

nawiązały ze sobą łączność, ale nie poprzez sklejenie ich w jedną drobinę materii, lecz tworząc między nimi związek opisywany za pomocą najsubtelniejszych znanych korelacji określanych mianem *korelacji Bella* [1]. Jak to zrobić najmniejszym nakładem sił i jakiego pomiaru dokonać, by stwierdzić, że te korelacje naprawdę łączą atomy – to były pytania, które sobie postawiliśmy [2]. Choć nasza praca jest czysto teoretyczna, zacznijmy od opisu dwu wstępnych kroków, czyli od pułapkowania i chłodzenia atomów, które należy wykonać w laboratorium, by można było skorzystać z proponowanych przez nas rozwiązań.

Należy zacząć od wstępnej selekcji, upewnić się, że w próbce znajdują się tylko atomy pożądanego pierwiastka, zazwyczaj jest to jeden z izotopów rubidu (^{87}Rb) lub sodu (^{23}Na). Gdybyśmy mieszała przedstawiciele wielu pierwiastków, ciężko byłoby wykonać kolejne kroki, gdyż każdy z nich inaczej reaguje na promieniowanie laserowe czy pola magnetyczne, które są podstawowymi narzędziami w doświadczeniach z gazami kwantowymi. Analogicznie, zanim rozpoczniemy koszarowanie i szkolenie kandydatów na żołnierzy, rekruci muszą stanąć przed komisją wojskową, tak by do jednostki trafiły osoby „zdolne do pełnienia służby wojskowej”.

Kolejny krok to chłodzenie atomów. Probka dostarcza atomy mniej więcej w temperaturze pokojowej, a tak ciepły gaz jest bardzo wzbudzony. Występują w nim niekontrolowane ruchy cząstek, które sprawiają, że atomami trudno manipulować tak, by osiągnąć zamierzony cel. Podobnie w przypadku żołnierzy – rozedrganemu rekrutowi ciężko będzie się skupić na szkoleniu, a i rozkazy

*ORCID: 0000-0002-9250-4227

mogą być dla niego niejasne. Stąd w obu przypadkach potrzeba wyciszenia tych chaotycznych drgań, a robi się to w układzie atomowym poprzez chłodzenie, czyli odbieranie gazowi energii. Można sobie wyobrazić, że analogicznie rekruci, zanim przejdą szkolenie, potrzebują odizolować się od zewnętrznego świata, oczyścić głowę, by móc skupić się na sprawach armii.

Chłodzenie gazu to skomplikowany proces składający się z wielu etapów takich jak świecenie laserem na wiązkę atomów, po to by spowolnić ich ruch, czy odparowywanie najgorętszych cząstek, tak jak chłodzi się gorąca kawa w kubku [3]. Nie jest moim celem przedstawienie szczegółowego opisu tej złożonej laboratoryjnej techniki, dość powiedzieć, że za jej rozwinięcie i udoskonalenie przyznano w 1997 roku Nagrodę Nobla [4]. Na potrzeby tej dyskusji wystarczy wiedzieć, że cały ten proces pozwala schłodzić atomy od temperatury pokojowej do miliardowych części kelwina powyżej zera bezwzględnego, kiedy to wszelkie chaotyczne ruchy zamierają. Rekruci się wyciszili – czas na koszarowanie.

Atomowe koszary to bańka próżniowa, w której lewitują schłodzone cząsteczki utrzymywane przez pola elektromagnetyczne. Próżnia jest po to, by odizolować atomowych adeptów od otoczenia, które jest, z ich perspektywy, gorące i pełne nieprzewidywalnych zdarzeń. Dopiero taki gaz kwantowy jest gotowy na kluczowy etap procedury – szkolenie, t.j. wiązanie atomów za pomocą subtelnych korelacji Bella.

Zanim przejdziemy do przysposobienia rekrutów, kilka słów o tym, dlaczego korelacje Bella były celem naszych rozważań. W 1935 roku Albert Einstein, Borys Podolski i Nathan Rosen (określani mianem EPR) napisali pracę [5], w której zauważyli, że mechanika kwantowa przewiduje możliwość tworzenia tzw. stanów splątanych, choć sam termin pochodzi od Edwina Schrödingera, który posłużył się nim w wydanej w tym samym roku pracy [6]. Jedną z konsekwencji splątania – nowego typu korelacji burzącej obraz klasycznego świata, do jakiego przywykliśmy, jest nielokalność mechaniki kwantowej. W wielkim skrócie: dwie odpowiednio splątane cząstki można rozesać na dowolnie dużą odległość, a następnie badając jedną z nich, natychmiastowo i bez przesyłania żadnej informacji, wpłynąć na stan drugiej. W tym zmienianiu stanu odległych układów tkwi sedno nielokalności. Trio EPR argumentowało, że mechanika kwantowa musi być niekompletna, skoro pozwala na takie „dziwactwa”.

W 1964 roku John Bell wykazał, że nie da się tej teorii uzupełnić czy „uklasyfikować” w taki sposób, by pozbyć się tych nieintuicyjnych zjawisk [7]. Nielokalność jest fundamentalną własnością mechaniki kwantowej, a ten rodzaj splątania, czyli relacji między cząstkami, która prowadzi do nielokalności, nazywamy korelacjami Bella. Związki

te tworzą zbiór najmocniejszych znanych korelacji i są przedmiotem badań doświadczalnych i teoretycznych od wielu lat. Zazwyczaj korelacje Bella bada się na najprostszym możliwym układzie, czyli takim, który składa się z dwu cząstek, tj. na parze elektronów, atomów czy fotonów.

Od jakiegoś czasu uwagę badaczy skupia możliwość „skalowania” tych korelacji, to znaczy wytworzenia nielokalności w większych układach składających się ze znacznej liczby cząstek [8]. Uzyskanie takich stanów byłoby ważne dla badań podstawowych; obserwowanie bardzo egzotycznych zjawisk kwantowych w układach prawie makroskopowych, to byłoby coś! Ponadto wiadomo, że takie złożone układy charakteryzowane korelacjami Bella są użyteczne, między innymi dla obliczeń kwantowych czy bardzo dokładnych pomiarów, na przykład fal grawitacyjnych docierających do Ziemi z Kosmosu. Znaczenie korelacji Bella doceniła Szwedzka Królewska Akademia Nauk, przyznając za ich badanie nagrodę w 2022 roku [9]. Osoby zainteresowane zagadnieniem nielokalności Bella odsyłam do artykułu prof. Marka Żukowskiego, który ukazał się niedawno na łamach *Postępów Fizyki* [10].

Czas na szkolenie. By sformować sprawny oddział żołnierzy, który nie rozsypie się od razu, gdy tylko poczujecie zapach prochu, należy ćwiczyć, ćwiczyć i ćwiczyć. Godzinami, dniami, tygodniami, indywidualnie i zespołowo. Praca zespołowa służy wyrobieniu odruchów, tak by oddział na polu bitwy poruszał się jak jedna spójna całość. Przed podobnym zadaniem staje „instruktor atomów” – celem jest wdrożenie takiej procedury, by atomy, początkowo od siebie niezależne i „niewiedzące” o sobie nawzajem, na końcu stworzyły wielocząstkowy bardzo silnie skorelowany stan.

I tu niespodzianka – w odróżnieniu od szkolenia rekrutów, korelowanie atomów nigdy nie wymaga, by oddziaływały one ze sobą wszystkie naraz. Praca zespołowa w gazie atomowym nie jest potrzebna. Wystarczy, że kwantowi adepci będą się szkolić w parach. To może zaskakiwać, gdyż ciężko sobie wyobrazić, by prawdziwi rekruci, zamknięci w parach w osobnych salach szkoleniowych, wypracowali umiejętności, które potem, na polu bitwy, pozwoliłyby oddziałowi zachowywać się jak spójna całość. Należy się raczej spodziewać, że taki podział na podgrupy przeniesie się na późniejsze rozczłonkowanie oddziału, co nie jest pożądane.

By rozwikłać tę pozorną sprzeczność, należy się odwołać do zjawiska, które nie ma żadnej analogii w świecie klasycznym. Cząstki jednego rodzaju (na przykład elektrony, albo atomy wodoru czy sodu) są

nierozróżnialne – nie mają żadnych cech osobowych, które pozwoliłyby stwierdzić, że dany atom to Zbigniew, inny zaś to Katarzyna. Wszystkie cząstki tego samego typu w opisie kwantowym są identyczne. To sprawia, że nie wiemy, które pary atomów oddziałują ze sobą. Zmuszeni jesteśmy uznać, że oddziałują wszystkie możliwe pary naraz, a zatem każdy atom z każdym, ale zawsze parami. W konsekwencji, mimo że „szkolenie atomowe” jest zawsze dwuciałowe, efektywnie rozciąga się na cały układ. Powstała korelacja jest bardzo mocna, na tyle mocna by można było mówić o nielokalności czy obecności korelacji Bella. Ten aspekt doświadczenia nie ma odzwierciedlenia w procesie szkolenia rekrutów – klasyczo/kwantowa analogia ma ograniczenia.

Głównym wynikiem pracy, której jestem współautorem, jest to, że oddziaływania par atomów szybko (w skali i tak szybkich zjawisk zachodzących na poziomie pojedynczych cząsteczek) dają efekt – powstają nielocalne korelacje Bella, które są prawdziwie wielociałowe, to znaczy obejmują wiele atomów. Ponadto udało nam się podać prosty przepis na to, ile cząstek jest ze sobą skorelowanych w danej chwili czasu. To jest istotna informacja, gdyż wiedza o „głębokości korelacji” pozwala określić, do jakiego stopnia taki wieloatomowy stan będzie przydatny w praktycznych zastosowaniach.

Pozostaje do omówienia jeszcze jeden wynik opisany w naszej pracy – pomiar, to znaczy co należy wykonać w laboratorium, by stwierdzić, że nienielocalne własności są rzeczywiście obecne w układzie. Jednak jest to kwestia na tyle złożona i odbiegająca od użytecznej analogii wojskowo-kwantowej, że pozwolę ją sobie w tym tekście przemilczeć i wyrazić nadzieję, że mimo wszystko, po lekturze tego artykułu Czytelnicy nie będą mieli refleksji analogicznej jak słuchacze po audycji radiowej: *dobrze się czytało, ale ciężko było coś zrozumieć*.

Literatura

- [1] Ryszard Horodecki, Paweł Horodecki, Michał Horodecki, Karol Horodecki, “Quantum entanglement”, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 865 (2009).
- [2] Marcin Płodzień, Maciej Lewenstein, Emilia Witkowska, Jan Chwedeńczuk, “One-Axis Twisting as a Method of Generating Many-Body Bell Correlations”, *Phys. Rev. Lett.* **129**, 250402 (2022).
- [3] Agata Wojciechowska, Maks Walewski, Michał Tomza, „Zimno... zimniej... kwantowo! - ultrazimne mieszaniny jonu z atomami”, *Postępy Fizyki* **74** (2), 19 (2023).
- [4] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1997/summary/>
- [5] Albert Einstein, Borys Podolsky, Nathan Rosen, “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?”, *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).
- [6] Edvin Schrödinger, “Discussion of Probability Relations between Separated Systems”, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **31**, 555 (1935).
- [7] John S. Bell, “On the Einstein Podolsky Rosen paradox”, *Physics* **1**, 195 (1964)
- [8] Marek Żukowski, Časlav Brukner, “Bell’s Theorem for General N-Qubit States”, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 210401 (2002); E. G. Cavalcanti, C. J. Foster, M. D. Reid, P. D. Drummond, “Bell Inequalities for Continuous-Variable Correlations”, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 210405 (2007).
- [9] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/summary/>
- [10] Marek Żukowski, „Kwantowe splątanie * nierówności Bella * teoretyczne podstawy obserwacji interferencji wielofotonowej * narodziny technologii kwantowych”, *Postępy Fizyki* **74** (2), 3 (2023).