



Kraków, 24 marca 2020 r.

Splątanie przez identyczność, czyli oddziaływanie bez kontaktu

Czym jest oddziaływanie i kiedy ono zachodzi? Intuicja podpowiada, że warunkiem koniecznym do zajścia oddziaływania niezależnie powstałych cząstek jest ich bezpośrednie spotkanie lub kontakt przez fizycznych pośredników. W mechanice kwantowej wynikiem oddziaływania jest splątanie, czyli pojawienie się nieklasycznych korelacji w układzie. Okazuje się, że teoria kwantów pozwala splątać niezależne cząstki bez konieczności ich kontaktu. Za to zjawisko odpowiedzialna jest fundamentalna identyczność cząstek tego samego rodzaju.

„Całość to więcej niż suma jej składników” – Arystoteles (Metafizyka, księga VIII)

Mechanika kwantowa jest obecnie najlepszą, najdokładniejszą i najbardziej wyrafinowaną teorią stosowaną przez fizyków do opisu otaczającego nas świata. Niemniej jednak jej charakterystyczną cechą jest abstrakcyjny język matematyczny notorycznie prowadzący do istotnych problemów interpretacyjnych. Obraz rzeczywistości proponowany przez tę teorię wciąż stanowi przedmiot naukowego sporu, który, zamiast wygasać wraz z upływem czasu, staje się coraz gorętszy i bardziej interesujący. Nowej motywacji i intrygujących pytań dostarcza świeże spojrzenie z perspektywy kwantowej informacji oraz ogromny rozwój technik doświadczalnych. Pozwala to na weryfikację wniosków płynących z subtelnych eksperymentów myślowych bezpośrednio związanych z problemem jej interpretacji. Co więcej, stajemy się obecnie świadkami wielkiego praktycznego postępu w dziedzinie kwantowej komunikacji oraz technologii komputerów kwantowych, który w sposób istotny czerpie z nieklasycznych zasobów oferowanych przez mechanikę kwantową.

Celem badań prowadzonych przez dr. hab. Pawła Błasiaka z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie oraz dr. Marcina Markiewicza z Uniwersytetu Gdańskiego jest analiza szeroko akceptowanych paradygmatów oraz koncepcji teoretycznych dotyczących interpretacji i podstaw mechaniki kwantowej. Badacze starają się znaleźć odpowiedź na pytanie, w jakim stopniu intuicje stosowane do opisu procesów kwantowo-mechanicznych znajdują uzasadnienie w ramach realistycznego obrazu świata. W tym celu za pomocą języka matematyki próbują doprecyzować określone idee teoretyczne, nierzadko funkcjonujące w formie ulotnych intuicji. Takie podejście owocuje niejednokrotnie pojawieniem się inspirujących poznawczo paradoksów. Oczywiście im bardziej podstawowa koncepcja, której dotyczy dany paradoks, tym lepiej, ponieważ w większym stopniu otwiera nowe drzwi do głębszego zrozumienia danego zagadnienia.

W tym duchu obaj naukowcy postanowili rozważyć fundamentalne pytanie: czym jest oddziaływanie i kiedy ono zachodzi? W mechanice kwantowej wynikiem oddziaływania jest splątanie, czyli pojawienie się nieklasycznych korelacji w układzie. Wyobraźmy sobie dwie cząstki powstałe niezależnie w odległych galaktykach. Wydawałoby się, że warunkiem koniecznym do pojawienia się ich oddziaływania jest wymaganie, aby w pewnym momencie ich ewolucji doszło między nimi do bezpośredniego spotkania bądź pośredniego kontaktu poprzez inną cząstkę lub fizyczne pole, które to oddziaływanie mogłoby przekazać. Jak bowiem inaczej mogą one nawiązać ową tajemniczą więź, jaką jest kwantowe splątanie? Paradoksalnie okazuje się jednak, że jest to możliwe. Mechanika kwantowa pozwala na zaistnienie splątania bez konieczności jakiegokolwiek, nawet pośredniego, kontaktu.

Aby uzasadnić tak zaskakującą tezę, należy przedstawić schemat, w którym cząstki wykażą nielokalne korelacje na odległość (w eksperymencie typu Bella). Subtelność owego podejścia polega na tym, aby po drodze wykluczyć możliwość zajścia oddziaływania rozumianego jako kontakt. Schemat taki powinien być również bardzo oszczędny, to znaczy musi wykluczać obecność pośredników, którzy owo oddziaływanie mogliby przekazać (fizyczne pole lub cząstki pośredniczące). Błasiak i Markiewicz pokazali, w jaki sposób można tego dokonać, wychodząc z oryginalnych rozważań Yurke'a i Stolera, które zreinterpretowali jako zwykłą permutację ścieżek cząstek pochodzących z różnych źródeł. Takie nowe spojrzenie pozwala generować dowolne stany splątane dwóch i trzech cząstek, unikając ich kontaktu. Zaproponowane podejście można bez trudu rozszerzyć na większą liczbę cząstek.

W jaki sposób możliwe jest splątanie niezależnych cząstek na odległość bez ich oddziaływania? Podpowiedzi udziela sama mechanika kwantowa, w której postuluje się identyczność, czyli fundamentalną nierozróżnialność wszystkich cząstek tego samego rodzaju. Oznacza to, że na przykład wszystkie fotony (jak również inne cząstki elementarne) w całym Wszechświecie są takie same, niezależnie od dzielącej je odległości. Z formalnego punktu widzenia sprowadza się to do symetryzacji funkcji falowej dla bozonów lub jej antysymetryzacji dla fermionów. Efekty związane z identycznością są zazwyczaj kojarzone ze statystyką cząstek, która ma konsekwencje w opisie oddziałujących układów wielocząstkowych (takich jak kondensat Bosego-Einsteina lub teoria pasmowa w ciele stałym). W przypadku prostszych układów bezpośrednim skutkiem identyczności jest zakaz Pauliego dla fermionów lub grupowanie w optyce kwantowej dla bozonów. Wspólną cechą wszystkich tych efektów jest kontakt cząstek w jednym punkcie przestrzeni, co jest zgodne z prostą intuicją oddziaływania (na przykład w teorii cząstek mówi się wprost o wierzchołkach oddziaływania). Stąd bierze się przekonanie, że konsekwencje symetryzacji można obserwować wyłącznie w ten sposób. Jednak oddziaływanie z samej swej natury powoduje splątanie. Dlatego nie jest jasne, co jest faktyczną przyczyną obserwowanych efektów i nieklasycznych korelacji: czy jest to oddziaływanie samo w sobie, czy może pierwotna nierozróżnialność cząstek? W zaproponowanym przez obu naukowców schemacie omija się tę trudność, eliminując oddziaływanie, do którego mogłoby dojść przez jakikolwiek kontakt. Stąd wniosek, że nieklasyczne korelacje są bezpośrednią konsekwencją postulatu identyczności cząstek. Znalaziono zatem sposób na czystą aktywację splątania pochodzącego od ich fundamentalnej nierozróżnialności.

Tego typu spojrzenie, wychodzące od pytań dotyczących podstaw mechaniki kwantowej, może mieć praktyczne zastosowanie do generowania stanów splątanych dla technologii kwantowych. W artykule pokazano, jak wytworzyć dowolny stan splątany dwóch i trzech kubitów, a pomysły te są już implementowane eksperymentalnie. Wydaje się, że rozważane schematy można z powodzeniem rozszerzyć do tworzenia dowolnych stanów splątanych dla wielu cząstek. W ramach dalszych badań obaj naukowcy zamierzają poddać głębszej analizie postulat cząstek identycznych, zarówno z punktu widzenia interpretacji teoretycznej, jak i zastosowań praktycznych.

Dużym zaskoczeniem może być fakt, że postulat nierozróżnialności cząstek nie jest tylko formalnym zabiegiem matematycznym, lecz w swojej czystej formie prowadzi do konsekwencji obserwowanych w laboratoriach. Czy zatem nielokalność stanowi nieodłączną cechę wszystkich identycznych cząstek we Wszechświecie? Foton emitowany przez ekran tego monitora oraz foton pochodzący z odległej galaktyki na krańcach Wszechświata wydają się być splątane tylko i wyłącznie przez swoją identyczną tożsamość. Stanowi to wielką tajemnicę, z którą nauce niebawem przyjdzie się zmierzyć.

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie zajmuje się strukturą materii i własnościami oddziaływań fundamentalnych od skali kosmicznej po wnętrza cząstek elementarnych. Wyniki badań – obejmujących fizykę i astrofizykę cząstek, fizykę jądrową i oddziaływań silnych, fazy skondensowanej materii, fizykę medyczną, inżynierię nanomateriałów, geofizykę, biologię radiacyjną i środowiskową, radiochemię, dozymetrię oraz fizykę i ochronę środowiska – są każdego roku przedstawiane w ponad 600 artykułach publikowanych w recenzowanych wysoko punktowanych czasopismach naukowych. Częścią Instytutu jest nowoczesne Centrum Cyklotronowe Bronowice, unikalny w skali europejskiej ośrodek obok badań naukowych zajmujący się terapią protonową nowotworów. IFJ PAN jest członkiem Krakowskiego Konsorcjum Naukowego „Materia-Energia-Przyszłość” o statusie Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW) na lata 2012-2017. Instytut zatrudnia ponad pół tysiąca pracowników. W 2017 roku Komisja Europejska przyznała IFJ PAN prestiżowe wyróżnienie „HR Excellence in Research” jako instytucji stosującej zasady „Europejskiej Karty Naukowca” i „Kodeksu Postępowania przy rekrutacji pracowników naukowych”. W klasyfikacji MNISW Instytut został zaliczony do kategorii naukowej A+ w grupie nauk ścisłych i inżynierskich.

KONTAKT:

dr hab. Paweł Błasiak
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 662 8270
e-mail: pawel.blasiak@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

1. Paweł Błasiak, Marcin Markiewicz
"Entangling three qubits without ever touching"
Scientific Reports **9**, 20131 (2019)
DOI: 10.1038/s41598-019-55137-3

POWIĄZANE STRONY WWW:

<http://www.ifj.edu.pl/>

Strona Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk

<http://press.ifj.edu.pl/>

Serwis prasowy Instytutu Fizyki Jądrowej PAN

MATERIAŁY GRAFICZNE:

IFJ20200324_foto1.jpg

HR: http://press.ifj.edu.pl/news/2020/03/24/IFJ20200324_foto1

Identyczność cząstek pociąga za sobą ich splątanie, które można obserwować również w czystej formie bez oddziaływania.
(Źródło: Shutter2U/Vecteezy)