



Kraków, 20 maja 2021

Znamy koszty wolnego wyboru i lokalności – w fizyce i nie tylko

Czy mamy wolny wybór, czy też nasze decyzje zostały wcześniej ustalone? Czy fizyczna rzeczywistość jest lokalna, czy może to, co robimy tu i teraz, ma natychmiastowy wpływ na wydarzenia gdzie indziej? Na tak podstawowe pytania fizycy szukają odpowiedzi w słynnych nierównościach Bella. Okazuje się, że wolny wybór i lokalny realizm można z pewnością mierzyć i porównywać. Otrzymane rezultaty odkrywają zaskakujące zależności o fundamentalnym i uniwersalnym charakterze, daleko wykraczające poza samą mechanikę kwantową.

Przyczynowość, lokalność i wolny wybór są powiązane za pomocą kilku prostych wzorów znanych jako nierówności Bella. Wyrafinowane doświadczenia optyków kwantowych z kilku ostatnich dekad bezsprzecznie dowiodły, że nierówności te są łamane. Dziś fizycy stoją więc przed dylematem: czy zaakceptować wizję realnego świata, w której kwestionujemy założenie o wolnym wyborze eksperymentatora, czy też odrzucić założenie lokalności przeprowadzanych eksperymentów? Naukowcy z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie (IFJ PAN), brytyjskiego City, University of London (CUL) i niemieckiej Technische Hochschule Mittelhessen w Giessen (THM) zmierzili się z tak postawionym problemem – i to dość dosłownie. Wyniki ich badań, daleko wykraczające poza samą fizykę, omówiono w artykule właśnie opublikowanym na łamach prestiżowego czasopisma *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*.

„Realizm to koncept fizyczny, w którego ramach opisujemy świat za pomocą relacji przyczynowo-skutkowych. Lokalność oznacza, że oddziaływania nie mogą rozchodzić się natychmiastowo. Jeśli więc fizyczna rzeczywistość ma spełniać wymogi lokalnego realizmu, na wynik eksperymentu będzie miało wpływ tylko to, co się znajduje w jego bezpośrednim otoczeniu, a nie to, co się dzieje właśnie teraz w odległej galaktyce”, tłumaczy dr hab. Paweł Błasiak, pierwszy autor artykułu.

Wolny wybór, pojęcie pozornie typowo filozoficzne, również można potraktować jako zagadnienie fizyczne, a nawet matematyczne. W tym ujęciu wolny wybór odnosi się do zmiennych opisujących parametry eksperymentu, czyli tego, co mierzymy w laboratorium. Zakładamy o tychże zmiennych, że możemy je swobodnie dobierać, niezależnie od tego, co się działo w przeszłości.

W ramach wizji świata, w której obowiązuje lokalny realizm oraz wolny wybór, można wyprowadzić nierówności Bella, a następnie przeprowadzić weryfikujący je eksperyment. Główne idee można tu zobrazować następująco. Alicja i Bob pracują w laboratoriach na przeciwnych krańcach galaktyki. Któregoś dnia otrzymują pudełka, każde po jednym. Ustawiają je na swoich stołach i w pewnym momencie ostrożnie otwierają. Ze środka wypada wirująca moneta, którą każdy eksperymentator dociska dłonią do stołu. Alicja i Bob notują teraz, czy moneta upadła do góry orłem czy reszką. Wkrótce nadchodzą kolejne, podobne przesyłki. Po pewnym czasie Alicja i Bob dysponują długą listą obserwacji, w których na różny sposób dociskali monety. Żadne nie widzi w swoich danych niczego niezwykłego: na ich listach orły i reszki pojawiają się w sposób czysto przypadkowy.

Sytuacja zmienia się dramatycznie, gdy Alicja i Bob spotykają się na Międzygalaktycznym Kongresie Naukowym. Porównują swoje dane i raptem się okazuje, że przy tych samych obserwacjach gdy moneta Alicji upadała reszką, moneta Boba zawsze upadała orłem – i odwrotnie. Oboje przyjmują więc, że nie jest to dziełem przypadku i za obserwowane przez nich korelacje musi odpowiadać jakaś wspólna przyczyna, tkwiąca w przeszłości obu obiektów wysyłanych z tego samego źródła.

dła. Tajemniczy nadawca przesyłek mógłby po prostu poinstruować każdą z monet, jak mają upaść będąc w dany sposób dociśniętą do stołu. Jeśli tak rzeczywiście jest, Alicja i Bob mogliby odgadnąć tę instrukcję i ogłosić spektakularne odkrycie. Niestety, ich wysiłki spełzają na niczym!

Zdesperowani, Alicja i Bob proszą genialnego teoretyka Johna o pomoc. Ten najpierw pyta, jakie założenia dwójka naukowców przyjmuje w swojej pracy za prawdziwe i pewne. *„Uważamy, że obserwowane przez nas korelacje powinny dać się wytłumaczyć przez ciąg propagujących się w czasie przyczyn i skutków”*, mówi Alicja. Bob doprecyzowuje: *„Sądzimy też, że żadna przyczyna nie oddziałuje natychmiast na eksperyment, jeśli znajduje się w odpowiednio dużej odległości od laboratorium”*. Oboje głęboko wierzą, że sposób, w jaki otwierają pudełka, nie jest im w żaden sposób narzucany i są święcie przekonani, że sami podejmują decyzję dotyczącą tego, jak uderzają dłonią w monetę. Ku ich ogromnemu zdziwieniu John spokojnie wyjaśnia, że tych wszystkich założeń nie da się pogodzić ze wszystkimi obserwowanymi przez nich korelacjami.

W rzeczywistości nierówności Bella zostały odkryte przez północnoirlandzkiego fizyka Johna Stewarta Bella w 1964 roku. Jego inspiracją był słynny problem *„upiornego oddziaływania na odległość”*, postawiony przez Alberta Einsteina, Borisa Podolskyego i Nathana Rosena w 1935 roku. W eksperymentach fizycznych, gdzie rolę monet odgrywają fotony, a orłem i reszką jest ich polaryzacja obserwowana w różnych kierunkach, nierówności te faktycznie są łamane. Współczesna fizyka ma więc fundamentalny dylemat: czy lepiej porzucić ideę lokalnego realizmu, czy może zakwestionować wolne wybory naukowców? Niewielu fizyków jest skłonnych kwestionować realizm, zakładający przyczynowość działającą zgodnie ze strzałką czasu. Zatem albo coś jest „nie tak” z założeniem lokalnego realizmu, albo z wolnym wyborem eksperymentatorów.

„Fakt łamania przez rzeczywistość nierówności Bella prowokuje do zadawania intrygujących pytań. Na przykład: jak często przy zachowaniu pełnej lokalności musielibyśmy łamać wolny wybór, by odtworzyć korelacje obserwowane w eksperymentach? Przy każdym pomiarze, w większości, czy może tylko w co którymś? Analogicznie, jeśli zachowamy wolny wybór, jak często musielibyśmy łamać lokalność?”, zastanawia się dr Błasiak.

Rezultaty badań polsko-brytyjsko-niemieckiej grupy przynoszą zaskakującą odpowiedź. Okazuje się, że aby odtworzyć rejestrowane korelacje, przy zachowaniu wolnego wyboru lokalność należałoby łamać równie często, jak wolny wybór przy zachowaniu lokalności. Z jakichś (nieznanych) powodów przyroda w najmniejszym stopniu nie faworyzuje ani lokalności, ani wolnego wyboru.

Naukowcom udało się wyprowadzić wzory pozwalające obliczyć, jak często Alicja i Bob musieliby łamać lokalność bądź wolny wybór, żeby odtworzyć obserwowane korelacje (w mechanice kwantowej i nie tylko). W szczególności okazuje się, że formalizm mechaniki kwantowej wymusza, by przy maksymalnym splątaniu między fotonami do łamania lokalności bądź wolnego wyboru dochodziło przy każdym pomiarze (co uogólnia wcześniejsze wyniki dotyczące samej lokalności).

„Najciekawsze, że twierdzenie Bella wcale nie jest twierdzeniem mechaniki kwantowej, lecz teorii prawdopodobieństwa, ma więc uniwersalny charakter. Twierdzenia udowodnione przez nas również nie ograniczają się do samej fizyki kwantowej, lecz dotyczą każdej sytuacji, w której mamy do czynienia z korelacjami dotyczącymi separowalnych układów”, podkreśla dr Błasiak.

„Poza fizyką sensu stricto, łamanie lokalności lub wolnego wyboru nie musi mieć dramatycznego charakteru. W badaniach dotyczących ludzkich zachowań do naruszenia lokalności wystarczyłoby, żeby Alicja szepnęła coś do Boba”, zauważa z kolei prof. Emmanuel Pothos, psycholog z CUL. Jeszcze inny przykład podaje prof. Christoph Gallus, ekonomista z THM: *„Jeśli Alicja i Bob są graciami na giełdzie, do skorelowania ich wyborów może dojść po prostu wskutek używania publicznie dostępnych informacji”*.

Uniwersalność znalezionych zależności otwiera drzwi do bardzo praktycznych zastosowań, takich jak badanie mechanizmów przepływu informacji w systemach złożonych. Warto podkreślić, że ogólność tego typu rozważań bierze się z natury samego pytania o przyczyny obserwowanych korelacji, które jest fundamentalne oraz wspólne dla całej nauki.

Badania po stronie polskiej sfinansowano ze środków Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej oraz amerykańskiego Office of Naval Research Global.

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie prowadzi badania podstawowe i aplikacyjne w obszarze fizyki oraz nauk pokrewnych. Główna część działalności naukowej Instytutu koncentruje się na badaniu struktury materii, w tym własności oddziaływań fundamentalnych od skali kosmicznej po cząstki elementarne. Częścią Instytutu jest nowoczesne Centrum Cyklotronowe Bronowice, unikalny w skali europejskiej ośrodek, obok badań naukowych zajmujący się terapią protonową nowotworów. IFJ PAN prowadzi też cztery akredytowane laboratoria badawcze i pomiarowe. Wyniki badań – obejmujących fizykę i astrofizykę cząstek, fizykę jądrową i oddziaływań silnych, fizykę 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. Corocznie Instytut jest organizatorem lub współorganizatorem wielu międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych oraz szeregu seminariów i innych spotkań naukowych. IFJ PAN jest członkiem Krakowskiego Konsorcjum Naukowego „Materia-Energia-Przyszłość”, któremu, na lata 2012-2017, nadany został status Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW). Wiele projektów i przedsięwzięć realizowanych przez Instytut jest wpisanych na Polską Mapę Infrastruktury Badawczej (PMIB). Instytut zatrudnia ponad pół tysiąca pracowników. 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 kategoryzacji MNiSW Instytut został zaliczony do najwyższej kategorii naukowej A+ w grupie nauk ścisłych i inżynierskich.

KONTAKT:

dr hab. **Paweł Błasiak**
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628270
email: pawel.blasiak@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„Violations of locality and free choice are equivalent resources in Bell experiments”
Paweł Błasiak, Emmanuel M. Pothos, James M. Yearsley, Christoph Gallus, Ewa Borsuk
PNAS 118 (17) e2020569118 (2021)
DOI: [10.1073/pnas.2020569118](https://doi.org/10.1073/pnas.2020569118)

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:

IFJ210520b_fot01s.jpg **HR:** http://press.ifj.edu.pl/news/2021/05/20/IFJ210520b_fot01.jpg
Artystyczna wizja słynnego eksperymentu Bella. Tancerze symbolizują eksperymentatorów w oddalonych od siebie laboratoriach. Sznury złożone z zer i jedynek, które krępują ich ruchy, nawiązują do ograniczonego wolnego wyboru, natomiast chmura zer i jedynek między tancerzami symbolizuje brak lokalności. Mechanika kwantowa odrzuca opis rzeczywistości zgodny z założeniami lokalności i wolnego wyboru. Naukowcy zainspirowani tym fundamentalnym odkryciem porównują wagę obu tych założeń. (Źródło: IFJ PAN / Iwona Michniewska)