

Nierówności Bella

Istniało wiele prób opracowania teorii mechaniki kwantowej z tzw. ukrytymi parametrami. Miało to ocalić wizję całkowicie deterministycznej, lokalnej mechaniki kwantowej. Istnieje słynny dowód, że żadna teoria z ukrytymi parametrami nie może być zgodna z mechaniką kwantową[1]. Od strony teoretycznej argument ten został opracowany w formie słynnych nierówności Bella dotyczących funkcji korelacji spinów cząstek.

Bell zaproponował eksperyment myślowy, który później doczekał się eksperymentalnej weryfikacji. Eksperyment. Zaproponowany eksperyment wymagał źródła cząstek o spinie $-1/2$. Jeden strumień cząstek porusza się na północ a drugi na południe. Cząstki w strumieniach mają taką samą prędkość. Na północy jak i na południu znajdują się dwa urządzenia rejestrujące spin cząstek. Ten północny spinomierz mierzy spin w kierunku do góry, a południowy w kierunku odchyłonym o pewien kąt A od kierunku spinomierza północnego. Porównując pomiary obydwu spinomierzy i Bell wyznaczył funkcje korelacji wskazującą w jakim stopniu spin cząstek w jednym strumieniu związany jest ze spinem drugich. Powtarzamy eksperyment i wykonujemy pomiar teraz dla kąta B różnego od A . W swoim rozumowaniu Bell założył, że obserwowane wartości spinów nie są losowe, lecz zależą od ukrytych parametrów.

Bell na podstawie takiego doświadczenia sformułował nierówność uwzględniającą relacje funkcji korelacji dla kątów A i B . Mając na uwadze teorie ukrytych parametrów, według której stan cząstek nie jest losowy lecz wynika z pewnej wewnętrznej, deterministycznej dynamiki opartej na ukrytych parametrach, Bell doszedł do wniosku, że układ ewoluujący zgodnie z jakąś teorią ukrytych parametrów musi spełniać nierówność. Przeprowadzone eksperymenty jednak wykazały, że owa funkcja korelacji nie spełnia nierówności Bella. Powszechnie zostało to uznane że mechanika kwantowa musi być probabilistyczna[2]. Czy nierówność Bella wyklucza jakąkolwiek teorię ukrytych

parametrów? Nierówność ta została sformułowana z założeniem lokalności. Zatem na pewno wyklucza wszystkie deterministyczne, lokalne teorie z ukrytymi parametrami. Roger Penrose powtarza konkluzję wynikającą z nierówności Bella: "żadna teoria lokalna (klasyczna czy teoria zmiennych ukrytych) nie pozwala na uzyskanie poprawnych, zgodnych z mechaniką kwantową prawdopodobieństw"[3].

Penrose opisuje w nieco odmienny sposób problem Bella, w jego propozycji wyraźniej widać nielokalny przeskok. Na początek przedstawia klasyczny eksperyment myślowy Einsteina, Podolskiego, Rosena w ujęciu Davida Bohma. Mianowicie bierze pod uwagę rozpad pojedynczej cząstki bez spinu w wyniku czego powstają dwie cząstki o spinie $\frac{1}{2}$, które określa jako elektron i pozyton. Oczywiście analogicznie obydwie cząstki poruszają się w przeciwnych kierunkach. Suma spinów obydwu cząstek musi być różna stanowi początkowemu, zatem niezależnie od kierunku pomiaru spinu elektronu spin pozyton zawsze będzie przeciwny. I zgodnie z charakterem wszystkich eksperymentów tego typu niezależnie od odległości cząstek ich spin zawsze będzie uzgodniony w taki sposób, że:

$$|Q\rangle = |E\uparrow\rangle |P\downarrow\rangle - |E\downarrow\rangle |P\uparrow\rangle.$$

E jest elektronem, a P pozytonem. Jakikolwiek byśmy wzięli kierunek pomiaru spiny, po pomiarze spinu elektronu, pozyton miałby dokładnie przeciwną wartość. Przeskok wartości pozytonu jest przeskokiem nielokalnym, niezależnym od odległości od elektronu. Jest to klasyczne ujęcie eksperymentu myślowego Einsteina, Podolskiego, Rosena (EPR).

Penrose opisuje podobny eksperyment który doczekał się empirycznego sprawdzenia. Mowa tutaj o eksperymencie Alaina Aspecta (1986) wykonanego na parach fotonów. Eksperyment wykorzystywał polaryzację par fotonów zamiast par cząstek o niezerowej masie o spinie $\frac{1}{2}$ jak przedstawiłem to powyżej. Foton mają spin równy 1. Nowością w eksperymencie Aspecta było to, iż wybór kierunku pomiaru spinu fotonu był dokonywany już

podczas loty danej pary. Zatem informacja z jednego detektora spinu do fotonu przy drugim detektorze musiałaby zostać przekazana z szybkością światła. Na czym dokładnie to polega? Mimo tego, iż oba fotony oddalają się od siebie, wektor stanu opisuje wciąż ich układ. Czyli wektor stanu przypisany jest całości nie każdemu fotonowi z osobna. Fotony na razie nie mają określonej polaryzacji, polaryzacją jest własnością całego układu. W przypadku pomiaru polaryzacji jednego z nich, wektor stanu układu przeskakuje w taki sposób, iż drugi foton posiada również określoną polaryzację[4]. I gdy zmierzmy polaryzację drugiego fotonu otrzymamy wynik zgodny z przewidywaniami mechaniki kwantowej. Parodoksalnie jednak pomiar pierwszego nie leży w stożku światła drugiego i odwrotnie – są one rozdzielne przestrzennie. W takim przypadku chociażby pytanie który pomiar został dokonany wcześniej traci sens. Na podstawie powyższych danych Penrose uważa, że takie przedstawienie eksperymentu Aspecta świadczy o niezgodności mechaniki kwantowej ze szczególną teorią względności[5], która w gruncie rzeczy jest teorią lokalną.

[1] por. Ian Stewart Czy Bóg Gra w Kości?, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2001, s. 388

[2] por. Ian Stewart Czy Bóg Gra w Kości?, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2001, s. 390

[3] Roger Penrose Nowy Umysł Cesarza, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000, s. 316

[4] por. Roger Penrose Nowy Umysł Cesarza, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000, s. 321

[5] tamże, s. 322

Jeżeli potrzebujesz konsultacji przy pisaniu pracy licencjackiej lub magisterskiej, to polecamy serwis [pisanie prac](#) - pomoc w pisaniu prac w granicach dozwolonych prawem