

JAN CZERNIAWSKI

Fizyka a magia: W sprawie oddziaływań na odległość

Wstęp

Obecnie, w związku z wynikami empirycznych testów nierówności Bella, uważa się, że teoria kwantów jest teorią ostateczną w tym sensie, iż nie może istnieć bardziej od niej podstawowa teoria z parametrami ukrytymi, chyba że za dopuszczalne uznać założenie o istnieniu oddziaływań bezpośrednich na odległość, które mogłyby stać za stwierdzonymi w stanowiących owe testy eksperymentach korelacjami kwantowymi. Innymi słowy, jeśli jakaś teoria z parametrami ukrytymi jest jeszcze w ich świetle możliwa, to musiałaby być nieusuwalnie nielokalna. Mówi się w związku z tym o kwantowym splątaniu stanów pierwotnie lokalnie powiązanych obiektów, które sprawia, że po ich rozseparowaniu przestrzennym wyniki pomiarów wielkości charakteryzujących jednego z nich natychmiastowo wpływają na odległość na wyniki pomiarów odpowiednich wielkości charakteryzujących drugi. Spróbuję zasiać nieco wątpliwości w stosunku do tego przeświadczenia.

Oczywiście z faktami się nie dyskutuje. Tu jednak mamy do czynienia nie z faktami, których nie zamierzam podważać, lecz z wyciągniętym z nich wnioskiem. Co więcej, wniosek ten nie dotyczy treści żadnej teorii fizycznej ani wyprowadzonych z niej przewidywań empirycznych, lecz możliwości pewnej przyszłej teorii. Jako taki, nie należy więc do fizyki,

lecz do filozofii fizyki – niezależnie od profesji tego, kto by go wyciągał. Zajmując się zaś od lat filozofią nauki, zauważyłem dość osobliwe zjawisko: otóż w dziedzinie, która powinna przecież być domeną krytycznego racjonalizmu, funkcjonują powszechnie uznane tezy o charakterze bezpodstawnych dogmatów. Wprawdzie czasem próbuje się na ich rzecz argumentować, jednak argumentacja bywa w luźnym związku z tezą, którą miała uzasadniać. Co gorsza, zdarza się, że na ich rzecz przytacza się argumenty, które świadczą... na rzecz tezy przeciwnej! Oznaczałoby to, że „uzasadniana” w ten sposób teza nie tylko jest bezzasadnym przesądem, ale wręcz jest zabobonem w rozumieniu Bocheńskiego, tj. jest to „wierzenie, które jest (1) oczywiście w wysokim stopniu fałszywe, a mimo to (2) uważane za na pewno prawdziwe” [Bocheński, 1994, s. 10].

Przygody tego rodzaju zdarzały mi się w obu dziedzinach filozofii nauki, zarówno w metodologii nauk, jak i w refleksji nad metafizycznymi implikacjami teorii naukowych. Spróbuję to stwierdzenie zilustrować kolejno przykładami z każdej z nich, by następnie zastanowić się, czy podobnego statusu nie ma wspomniany wyżej pogląd. W końcu przedstawię argumentację sugerującą, że taki status mieć może.

Zanim przejdę do przykładów, zwrócę uwagę na jeszcze jedno zjawisko w filozofii nauki, związane ze wspomnianym wyżej w tym sensie, że do pewnego stopnia tłumaczy występowanie tamtego. Otóż każdy przyszły filozof nauki przechodzi proces mniej lub bardziej formalnej edukacji. Jego nauczyciele zaś, aby szybciej osiągnąć odpowiednie efekty kształcenia, stosują różne uproszczenia dydaktyczne. Teoretycznie obowiązuje przy tym niepisana zasada, by w ich ramach mówić wprawdzie nie CAŁĄ prawdę, ale jednak TYLKO prawdę. Niestety, nie każdy tej zasady się trzyma i razem z prawdą przemycane są stwierdzenia fałszywe, których intencją jest zasugerowanie adeptom rzekomej nieuchronności różnych niewystarczająco uzasadnionych rozstrzygnięć preferowanych przez ich mistrza. Wielu z nich potem trudno się przed sobą przyznać, że dali się zmanipulować, więc całą swoją inteligencję wysilają na dorabianie do tych rozstrzygnięć pseudouzasadnień, zamiast nabrać dystansu do wpojonych im przeświadczeń i poszukiwać rzetelnych rozstrzygnięć odpowiednich kwestii oraz rzetelnych uzasadnień dla nich. Sprzyja to petryfikacji w filo-

zofii nauki różnych przesądów, czy wręcz rozumianych jak wyżej zabobonów. Nieco uwagi poświęcę więc również omówieniu przykładów takich „uproszczeń dydaktycznych”.

Zabobony w metodologii nauk

Drastycznym przykładem przesądu, czy wręcz zabobonu, w metodologii nauk jest teza Duhema-Quine’a, zgodnie z którą każdą hipotezę można obronić przed falsyfikacją przez odpowiednią modyfikację hipotez pomocniczych, w których „towarzystwie”, w świetle tezy sformułowanej przez Pierre’a Duhema, występuje ona do testu empirycznego. Jak już dawno wykazano, w odróżnieniu od tezy Duhema, jej wzmocniona wersja autorstwa Willarda Van Orman Quine’a nie ma żadnej podstawy logicznej [Grünbaum, 1960; Czerniawski, 1998] ani nawet empirycznego oparcia w historii nauki [Andersson, 1988, r. 7, 4, 3].

Ewidentnym zabobonem jest natomiast pogląd, który można nazwać „konwencjonalizmem bazowym”. W jego ramach uważa się, że składające się na empiryczną bazę nauki zdania obserwacyjne są w pewnym sensie konwencjami [Popper, 1977, §30]. Doznania percepcyjne eksperymentatora nie uzasadniają bowiem takiego zdania „w większym stopniu niż przez walenie pięścią w stół”. Jest ono hipotezą, którą zawsze można dalej sprawdzać, konfrontując ją z innymi zdaniami bazowymi, które jednak również są hipotezami, więc też mogą być sprawdzane tylko w ten sposób. „Procedura ta nie ma naturalnego końca”, zatem można ją przerwać tylko arbitralną decyzją, by pewnych zdań bazowych dalej nie sprawdzać.

Hipotetyczny charakter zdań bazowych niewątpliwie wynika z ich uteoretyzowania, wyrażającego się w uzależnieniu ich uznania od przyjętych hipotez ogólnych. Naturalne zaś wydaje się przyjąć, iż uzależnienie to jest stopniowalne, w związku z czym budzące kontrowersje pomiędzy zwolennikami różnych teorii zdania bazowe powinno się sprawdzać przez ich konfrontację ze zdaniami uteoretyzowanymi w niższym stopniu, w ostatecznym rozrachunku z takimi, których uznanie zależy tylko od hipotez ogólnych wspólnych dla wszystkich stron kontrowersji [Anders-

son, 1988, r. 6, 8B]. Nie widać więc powodu, dla którego procedura ich sprawdzania miałyby nie mieć naturalnego końca.

Można jednak twierdzić, że zakwestionowane mogą zostać również te wspólne hipotezy. Czy uzasadniałoby to tezę o braku naturalnego końca dla sprawdzania zdań bazowych? Owszem, gdyby na prawdzie opierał się inny zabobon, jakim jest antyfundamentalizm [Czerniawski, 2013]. Za pewnik przyjmuje się mianowicie pogląd, że wszystkie zdania obserwacyjne są hipotezami, więc nie istnieje żaden ostateczny fundament wiedzy naukowej, na który miałyby składać się zdania niehipotetyczne. Tymczasem istnieje przecież poziom zdań zdających sprawę z doznań percepcyjnych eksperymentatora [Zahar, 1983], dla którego nie są one bynajmniej hipotezami, gdyż nie musi on domyślać się treści doznań, które sam przeżywa.

Jeśli jednak nawet ktoś uznaje istnienie takiego poziomu zdań obserwacyjnych, zazwyczaj będzie kwestionował użyteczność zdań z tego poziomu dla sprawdzania teorii naukowych. Refleksja nad genezą tego przeswiadczenia pozwala zauważyć, że ma on związek z innym, dość powszechnym wśród metodologów poglądem, jakim jest antyindukcjonizm, uważany za ważny składnik falsyfikacjonizmu, jeśli nie wręcz za jego istotę. W jego ramach uważa się, że jedynym wartościowym wynikiem sprawdzania teorii jest jej falsyfikacja, zaś pozytywne potwierdzenie jest bezwartościowe, gdyż rzekomo można je zawsze znaleźć [Popper, 1999]. Po części motywuje go omówiony wyżej inny zabobon, jakim okazała się teza Duhema-Quine'a; przede wszystkim jednak wynika on z nadinterpretacji faktu, że wnioskowanie indukcyjne z samej swojej istoty jest zawodne.

Oczywiście prawdziwe przewidywanie może wynikać z fałszywej teorii. Nie może to jednak być byle jaka teoria fałszywa, lecz powinna ona pozwolić wyjaśnić zaobserwowane zjawisko. Wśród różnych takich teorii wyjaśniających pewien zakres zjawisk może zaś być taka, która dostarcza ich najlepszego wyjaśnienia. Pozwala to sformułować kryterium prawomocności wnioskowania indukcyjnego: jest ono mianowicie prawomocne, gdy stanowi wnioskowanie do najlepszego wyjaśnienia [Harman, 1965].

Zabobony w filozofii fizyki

Inną dziedziną filozofii nauki, w której występują przesady i zabobony, jest jej dział zajmujący się podstawami fizyki. Można wymienić szereg założeń i wniosków powszechnie przypisywanych różnym teoriom fizycznym całkowicie bezpodstawnie, a w dodatku o niektórych z nich konkluzywnie wykazano, że nie należą do koniecznych treści owych teorii. Jako pierwszy przykład rozważmy współczesny pogląd na temat stosunku mechaniki nierelatywistycznej do koncepcji przestrzeni absolutnej. Otóż uważa się, że teoria ta, a zwłaszcza stanowiąca jej twierdzenie zasada względności Galileusza, jest niespójna z założeniem istnienia absolutnej przestrzeni [zob. Wawrzycki, 2011].

Zwolenników tego poglądu wcale nie zastanawia fakt, iż koncepcję tę Newton położył u podstaw swojej teorii i żadnej sprzeczności w tym nie widział. Co więcej, współczesny specjalista o najwyższych kompetencjach nie tylko tego zarzutu nie podnosi, lecz zauważa, iż Newton w swoich czasach nie dysponował żadnym innym konceptualnym środkiem dla nadania ścisłego sensu założeniom swojej teorii [Penrose, 2006]. Zabobonem jest więc nie tylko pogląd, że mechanika nierelatywistyczna wyklucza przestrzeń absolutną, lecz również mniej radykalna opinia, jakoby Newton dla celów teoretycznych koncepcji tej w ogóle nie potrzebował. Ciekawe, że jako argument przeciwko istnieniu przestrzeni absolutnej w modelu tej teorii traktuje się zakładane przez zasadę względności istnienie klasy uprzywilejowanych układów odniesienia, jakimi są układy inercjalne. Tymczasem bez niej, nie dysponując pojęciami geometrii różniczkowej, trudno uzasadnić przypisanie takiego wyróżnionego statusu tym, a nie innym układom.

Do specyfiki mechaniki nierelatywistycznej należy, iż jest teorią obecnie przez specjalistów dość dobrze zrozumianą. Cechę tę dzieli z nią szczególnie teoria względności (STW). Na temat jej podstaw panuje jednak również szereg przeświadczeń o charakterze zabobonów. Centralną rolę odgrywa wśród nich dogmat, jakoby teoria ta wykluczała istnienie eteru elektromagnetycznego. Tymczasem, jak dawno temu zauważył Wolfgang Pauli [1921, s. 25], II postulat Einsteina to nie co innego, jak tylko pozო-

stałość hipotezy eteru, bez której pozostaje niewyjaśnionym stwierdzeniem faktualnym. Dopóki więc Hermann Minkowski nie wprowadził do obiegu pojęcia czasoprzestrzeni, eter miał w stosunku do STW status analogiczny do opisanego wyżej statusu przestrzeni absolutnej w stosunku do mechaniki nierelatywistycznej.

Paradoksalnie, właśnie II postulat traktowany bywa jako koronny argument przeciw eterowi. Byłoby to zupełnie niezrozumiałe, gdyby rozumieć go zgodnie z oryginalnym sformułowaniem, stwierdzającym, że w pewnym („spoczywającym”), w domyśle: inercjalnym, układzie odniesienia każdy promień świetlny rozprzestrzenia się z określoną, stałą prędkością, niezależnie od tego, czy jest emitowany przez źródło spoczywające, czy poruszające się [Einstein, 2005, s. 122, 125]. Aby więc można było próbować wykorzystać go do tego celu, konieczna była jego reinterpretacja, obecnie prawie powszechnie reprezentowana w podręcznikach fizyki i tekstach filozoficznych: ma on stwierdzać, że tak jest we wszystkich układach inercjalnych. Faktycznie jednak ta reinterpretacja sprowadza się do podstawienia w miejsce postulatu Einsteina pewnej konsekwencji obu postulatów, wziętych razem [Baierlein, 2006, s. 193–195]. Gdyby bowiem taka była treść tego postulatu, to niezrozumiałe byłoby określenie go przez samego Einsteina jako „pozornie sprzecznego” [Einstein, 2005, s. 122] z pierwszym, tj. z zasadą względności.

Jako argument przeciw eterowi wykorzystywany bywa zresztą również I postulat. Oczywiście znów do pełnienia tej funkcji musi zostać odpowiednio podretuszowany. Zamiast więc rozumieć go, w zgodzie z oryginalnym sformułowaniem, jako stwierdzenie, że prawa przyrody wyrażają się jednakowo we wszystkich układach inercjalnych, przypisuje mu się stwierdzanie jakiegoś bliżej nieokreślonego „równouprawnienia” układów inercjalnych – które, inaczej niż sformułowanie oryginalne, miałyby wykluczać wyróżnienie któregośkolwiek z nich pod jakimkolwiek fundamentalnym względem, takim jak spoczywanie w nim eteru. W takim rozmydlonym sformułowaniu miałyby on więc być silniejszy logicznie niż w sformułowaniu ścisłym.

Intuicję stojącą za owym niejasnym „równouprawnieniem” wspiera pogląd, jakoby przekształcenie Lorentza było obrotem czasoprzestrzeni-

nym, wobec czego brak wyróżnionego układu inercjalnego, reprezentowanego w czasoprzestrzeni przez wyróżniony kierunek czasopodobny, miałby być odpowiednikiem braku wyróżnionego kierunku w przestrzeni. Taki jego obraz przemawia do wyobraźni, ale wzięty dosłownie jest fałszywy. Przekształcenie Lorentza jest pseudoobrotom, który można określić jako „obrót hiperboliczny”, pamiętając jednak, że chodzi o przekształcenie mające tylko pewne podobieństwo formalne do obrotu. To podobieństwo można wprawdzie wzmocnić za cenę wprowadzenia urojonej współrzędnej czasowej, jednak parametr występujący w roli „kąta obrotu” musi być wtedy urojony [Czerniawski, 2003, s. 253–254].

Kolejnym przykładem sytuacji, gdy „słuszną” tezę „potwierdza” wszystko, jest wykorzystywanie przeciwko eterowi efektów relatywistycznych. W szczególności, relatywistyczne skrócenie długości ma być efektem istotowo różnym od związanego z ruchem względem eteru skrócenia przewidywanego przez hipotezę Lorentza-FitzGerald, rzekomo nie wymagając wyjaśnienia przyczynowego [zob. Kroes, 1983, s. 36]. Cytowany wcześniej Pauli [1921, s. 36] był jednak odmiennego zdania. Jeśli bowiem założyć, że eter spoczywa w pewnym układzie inercjalnym i występuje przewidziany przez tę hipotezę efekt, a przy tym obowiązuje zasada względności, to taki sam efekt powinien wystąpić w dowolnym innym układzie inercjalnym, tj. powinien pojawić się relatywistyczny efekt skrócenia długości. Co więcej, hipoteza eteru pozwala go wyjaśnić jako konsekwencję efektu przewidzianego przez hipotezę L-F, tamtego zaś – jako skutku ruchu względem eteru [Bell, 1987; Czerniawski, 2009, s. 86–88]. W przeciwnym razie efekt relatywistyczny trzeba przyjąć jako „goły” fakt – o ile nie traktować nazbyt poważnie jego „wyjaśnienia” jako rzekomego skutku geometrii czasoprzestrzeni, które ewidentnie ma charakter „stawiania wozu przed konia” [Brown, Pooley, 2006; Czerniawski, 2009, s. 200].

„Uproszczenia dydaktyczne” w prezentacji eksperymentów EPR

Jak widać na przytoczonych przykładach, nawet wokół podstaw tak dobrze zrozumianych teorii, jak mechanika nierelatywistyczna czy szcze-

gólna teoria względności, w obiegu są ewidentne zabobony. Naturalne więc jest tym bardziej spodziewać się ich w dziedzinie interpretacji treści mechaniki kwantowej, ciągle jeszcze dalekiej od pełnego zrozumienia. Kluczową rolę odgrywa tu kwestia interpretacji indeterminizmu kwantowego i powiązana z nią kwestia możliwości zbudowania deterministycznej teorii z parametrami ukrytymi, która odtwarzałaby wyniki teorii kwantowej. Na rzecz pozytywnego rozstrzygnięcia tej drugiej Einstein z dwoma współautorami przedstawił eksperyment pomyślany, znany dziś, od inicjałów autorów, jako argument EPR [Einstein, Podolsky, Rosen, 1935, s. 777–780]. Podważał on interpretację zasady nieoznaczoności jako wyrazu fundamentalnego niedookreślenia wielkości charakteryzujących obiekt fizyczny, przedstawiając sytuację, gdy cząstce można na podstawie pomiarów przypisać zarazem wartości obu kanonicznie sprzężonych wielkości z dokładnością przekraczającą ograniczenie nakładane na nie przez zasadę nieoznaczoności.

Eksperyment pomyślany na ogół nie może stanowić konkluzywnego argumentu rozstrzygającego, gdyż jego wynik zależy od różnych założeń, które mogą być kwestionowane. Argumentem takim może być co najwyżej test empiryczny. Aby jednak mogło do niego dojść, konieczne bywa nieraz wykonanie poważnej pracy teoretycznej, umożliwiającej przekład rozstrzygnięć badanego zagadnienia na konkretne przewidywania empiryczne. W przypadku argumentu EPR przełomowy charakter miał wynik uzyskany przez Johna Stewarta Bella [1964, s. 195–200], który wykazał, że przy wyglądających na dość naturalne warunkach nałożonych na teorię z parametrami ukrytymi teoria taka nie jest w stanie przewidzieć tak mocnych korelacji statystycznych wyników pomiarów przeprowadzonych niezależnie na oddalonych od siebie obiektach, jak mechanika kwantowa. Dzięki dalszemu postępowi teoretycznemu związanemu z rozwijaniem jego idei udało się zaprojektować i zrealizować eksperymenty, które potwierdziły w tym zakresie przewidywania mechaniki kwantowej – co uznano za empiryczny dowód niemożliwości zbudowania bardziej podstawowej od niej teorii z parametrami ukrytymi.

Przy założeniu, że wniosek ten jest uzasadniony, stanowiłby on wynik o ogromnej doniosłości światopoglądowej, zasługujący na jak najszerzą

popularyzację. Należy zauważyć, że chodzi tu o zagadnienie bardzo zaawansowane teoretycznie i przez to stwarzające ogromne trudności próbom jego uprzyśpieszenia szerokiej publiczności. Zrozumiałe jest więc stosowanie przy takich próbach różnych uproszczeń dydaktycznych. Nie wszyscy popularyzatorzy jednak przestrzegają wspomnianej już niepisanej maksymy, by w dydaktyce mówić „tylko prawdę, choć niekoniecznie całą prawdę”.

Przykładem zgodnego z nią ujęcia jest choćby stwierdzenie, że hipoteza skrócenia Lorentza-FitzGerala NIE WYSTARCZA [Kopczyński, Trautman, 1981, s. 63] do wyjaśnienia negatywnego wyniku eksperymentu Kennedy’ego-Thorndike’a na wykrycie ruchu Ziemi względem eteru (autorzy na użytek dydaktyczny abstrahują tu od kwestii możliwości jej odpowiedniego uzupełnienia, ale to, co piszą, jest literalnie zgodne z prawdą). Niestety, autorzy niektórych podręczników i opracowań popularnonaukowych nie są tak powściągliwi i już wynik eksperymentu Michelsona-Morleya przedstawiają jako nieodwołalną falsyfikację hipotezy eteru – co jest grubym fałszem.

Podobnie, o ile nie gorzej, jest z popularyzacją argumentu EPR i nawiązujących do niego eksperymentów. Przede wszystkim, dość popularną praktyką jest przypisywanie Einsteinowi i współautorom – domyślnie, a czasem nawet wprost – argumentu dotyczącego spinów pierwotnie pozostających w stanie związonym, a następnie odseparowanych od siebie obiektów. Tymczasem ta wersja argumentu nie pochodzi od nich, lecz od D. Bohma [1951, s. 614–615; Bohm, Aharonov, 1957, s. 1070–1076] i dość zasadniczo różni się od wersji oryginalnej, dotyczącej położenia i pędów. Poinformowanie o tym audytorium lub czytelników nie kosztowałoby wiele i w niczym nie zaszkodziłoby rzetelnemu przekazowi od strony merytorycznej. Nie pozwalałoby tylko zdyskontować efektu retorycznego wynikającego z wytworzenia fałszywego wrażenia, że sam Einstein tu się pomylił.

Taki zabieg jednak jest w miarę nieszkodliwy, jeśli nie stoi za nim zamiar wprowadzenia odbiorców w błąd w jakiejś kwestii merytorycznej. Tymczasem niekiedy próbuje się dać do zrozumienia, że natychmiastowe korelacje między wynikami odległych pomiarów to coś specyficznie kwan-

towego, bez żadnego odpowiednika w fizyce klasycznej [Heller, 1996, s. 137–138; Heller, Pabjan, 2007, s. 100–101]. To zaś jest przecież fałszem. Na przykład z odpowiedniej zasady zachowania również klasycznie wynika, że jeśli początkowy spin układu dwóch cząstek był zerowy, to pomiar rzutu spinu na dany kierunek jednej z cząstek pozwala jednoznacznie przewidzieć wynik pomiaru rzutu spinu drugiej na ten sam kierunek jako taki sam co do wartości, lecz o przeciwnym znaku. Różnice pojawiają się dopiero w przypadku, gdy dla drugiej cząstki mierzy się rzut spinu na inny kierunek, który też nie jest w stosunku do pierwszego prostopadły. Różnica polega więc nie na tym, że klasycznie nie powinno być żadnych korelacji, lecz co najwyżej, że musiałyby one być inne niż przewidywane przez mechanikę kwantową.

Podkreślanie kwantowej specyfiki korelacji EPR służy inne przekłamanie. Otóż eksperymenty badające te korelacje przedstawia się jako dotyczące par elektronów. Tymczasem ich przeważająca większość, w tym najdonioślejsze z nich [Aspect, Grangier, Roger, 1979, s. 91–94; Aspect, Dalibard, Roger, 1979, s. 1804–1807] ma charakter optyczny, tj. dotyczy par fotonów, zaś eksperymentu tego rodzaju z wykorzystaniem elektronów, jak się zdaje, dotąd praktycznie w ogóle nie przeprowadzono. Rozważanie takiej wersji eksperymentu pozwala jednak przedstawić korelację jako konsekwencję specyficznie kwantowego zakazu Pauliego [Heller, Pabjan, 2007, s. 100], spełnianego przez fermiony, jakimi są elektrony, cząstki o spinie połówkowym, lecz nie przez fotony, które są bozonami – cząstkami ze spinem całkowitym.

W rzeczywistości w stanowiącym inspirację do eksperymentów tego rodzaju eksperymencie pomyślanym sam Bohm rozpatrywał pomiary na dwóch atomach będących produktami rozpadu dwuatomowej molekuly o całkowitym spinie zerowym, w której każdy z atomów ma spin połówkowy (tj. taki, jaki ma elektron) w wyniku jakiegoś oddziaływania zmieniającego całkowitego spinu. Uproszczona odmiana tego eksperymentu pomyślanego mówi o dwóch bliżej nieokreślonych cząstkach o spinie połówkowym; założenie o połówkowości spinu nie jest jednak istotne i od niego również można abstrahować. W dalszych rozważaniach eksperyment EPR będzie więc rozumiany w taki uproszczony, abstrakcyjny sposób.

Oddziaływania na odległość?

W wynikach eksperymentów dotyczących korelacji EPR jako najbardziej zaskakujący traktuje się fakt, iż wyniki odległych, lokalnych obserwacji są skorelowane tak, jak gdyby wynik pomiaru w jednym miejscu wpływał na odległość na rozkład prawdopodobieństwa wyników pomiarów w innym. Uważa się więc, że aby mogły one zostać przewidziane na podstawie jakiejś teorii z parametrami ukrytymi, musiałaby ona zakładać jakieś oddziaływanie na odległość między badanymi obiektami. Co więcej, oddziaływanie to musiałoby być natychmiastowe, gdyż wynik pomiaru na jednym z obiektów powinien wpłynąć na prawdopodobieństwa możliwych wyników równoczesnych, niezależnych pomiarów na drugim. Nie mogłoby więc być zapośredniczone przez jakiś impuls przemieszczający się ze skończoną prędkością. Czy jednak dopuszczenie takich oddziaływań nie byłoby kosztem zbyt wysokim?

Idea oddziaływania bezpośredniego na odległość może kojarzyć się raczej z czarną magią niż z fizyką. Od zarania dziejów obecne było wierzenie, że czarownik jest w stanie przez odpowiednie praktyki zaszkodzić komuś na odległość. Podobna intuicja stoi za astrologią w wersji zakładającej wpływ ciał niebieskich na przebieg zdarzeń na Ziemi. Była ona zgodna z platońską wizją przyrody podporządkowanej transcendentnym ideom. Przeciwna intuicja, wywodząca się co najmniej od starożytnych atomistów, wyklucza oddziaływanie bezpośrednie na odległość, dopuszczając jedynie oddziaływania zdalne zapośredniczone przez łańcuchy przyczynowe, złożone z oddziaływań lokalnych, czy lepiej: przez ciągłe procesy przenoszące oddziaływanie z jednego miejsca do innego.

Ten drugi sposób myślenia w czasach nowożytnych znalazł swój wyraz między innymi w fizyce kartezjańskiej. Nic dziwnego, że reprezentowana przez Isaaca Newtona interpretacja grawitacji jako oddziaływania bezpośredniego na odległość napotkała opór. Kartezjanin Leibniz [1969, s. 360] pisał z przekąsem: „[...] gdyby Bóg chciał uczynić tak, aby ciało wolne posuwało się w eterze po linii kolistej wokół pewnego stałego środka, i to bez udziału żadnego innego stworzenia, to powiem, że mogłoby to się stać tylko cudem [...]”. Z czasem jednak fizykę kartezjańską wyparła

bardziej od niej eksplanacyjnie efektywna fizyka newtonowska, a wraz z nią powróciła do fizyki idea oddziaływania zdalnego. Skądinąd warto zauważyć, że sam Newton nie był do niej przywiązany i uważał ujęcie grawitacji jako oddziaływania bezpośredniego za rozwiązanie prowizoryczne, pozwalające „nie wymyślać hipotez” [Newton, 2011, s. 694] w sytuacji, gdy nie dysponował teorią sprowadzającą ją do procesu przy czynowego, spełniającą wysoki standard naukowości, który sam ustanowił.

Do intuicji odrzucającej oddziaływanie zdalne powrócono w związku z wypracowaniem koncepcji pola. W jej świetle ciało nie działa na inne, odległe ciało bezpośrednio, lecz za pośrednictwem wytwarzanego przez siebie pola. Początkowo pole można było interpretować instrumentalistycznie, jako matematyczną fikcję pozwalającą uprościć opis oddziaływań zdalnych. Gdy jednak James Clerk Maxwell przewidział możliwość fali elektromagnetycznej jako zjawiska niepoddającego się takiej interpretacji, konieczne okazało się potraktowanie pola jako specyficznego bytu wypełniającego przestrzeń i pośredniczącego w oddziaływaniach.

Obecność pola przejawia się między innymi we wpływie na ruch ciał. Abstrakcyjnie można je było ująć jako modyfikację własności przestrzeni – w tym również próżni, jako przestrzeni pozbawionej ciał. Gdyby jednak przez próżnię rozumieć metafizyczną pustkę, „niebyt”, byłoby niezrozumiałe, że „coś” takiego można modyfikować, w dodatku tak, by wpływało na ruch ciał. Naturalne było więc skonkludować, że modyfikacji podlega nie sama przestrzeń, lecz jakaś wypełniająca ją substancja. W ten sposób do fizyki powróciła, traktowana dotąd jako relikwiarz kartezjanizmu, idea eteru. Pozwalała ona zinterpretować pole jako stan eteru, zaś określającą je wielkość – jako jego lokalnie określoną własność.

Nasuwało się, by potraktować eter jako coś w rodzaju ośrodka zdolnego do przenoszenia oddziaływań w postaci jego zaburzeń. Na zasadzie analogii z falą świetlną można było zakładać, że takie zaburzenia powinny rozprzestrzeniać się z pewną skończoną, stałą prędkością, stanowiącą własność owego „ośrodka” – którą, według tego wyobrażenia, była prędkość światła. Oznaczałoby to, że zapośredniczone przez nie oddziaływanie z istoty nie może być natychmiastowe.

Dodatkowe wsparcie wniosek ten uzyskał od szczególnej teorii względności. Fizyka nierelatywistyczna nie nakłada na prędkość rozprzestrzeniania się impulsów przyczynowych żadnego ograniczenia i w zasadzie dopuszcza ich rozprzestrzenianie się dowolnie szybko. Co najmniej więc nie wykluczała ich rozprzestrzeniania się natychmiastowo. To jednak umożliwiała zakładana przez nią absolutność równoczesności. Wprowadzona przez STW względność równoczesności oznaczała, że jeśli dwa zdarzenia są równoczesne w pewnym inercjalnym układzie odniesienia, to w innym jedno z nich może być wcześniej od drugiego. W szczególności skutek mógłby poprzedzać przyczynę. Nic takiego nie grozi jedynie pod warunkiem, że interwał czasoprzestrzenny między przyczyną a skutkiem jest czasopodobny, co oznacza, iż następstwo czasowe przyczyny i skutku jest absolutne, niezależne od układu odniesienia, a przenoszący oddziaływanie impuls nie tylko nie może rozprzestrzeniać się natychmiastowo, ale nawet prędkość jego rozprzestrzeniania się nie może być większa niż prędkość światła w próżni.

Oczywiście można było powrócić do pierwotnego wyobrażenia oddziaływań zdalnych jako bezpośrednich. Niezależnie jednak od wspomnianych wyżej skojarzeń tak rozumianych oddziaływań na odległość z magią i sugerowanej przez nie przynależności odległości przestrzennej do dziedziny pozorów, w świetle STW pozostaje jeszcze nieintuicyjny fakt, że w oddziaływaniu, które byłoby natychmiastowe w pewnym układzie odniesienia, w pewnych innych już takie by nie było, a w niektórych z nich skutek poprzedzałby przyczynę. Poważne potraktowanie szczególnej teorii względności oznacza więc, że dopuszczalność takich oddziaływań można przyjąć tylko w ostateczności.

Paradoks

Argument EPR określa się czasem jako „paradoks EPR”. Co jednak właściwie jest w nim paradoksalnego? Otóż, według interpretacji kopenhaskiej, położenie cząstki, której pęd jest określony dokładnie, nie jest w ogóle określone – i odwrotnie. Jeśli jednak układ dwóch cząstek o cał-

kowitym pędzie zerowym rozpadnie się i zostanie zmierzony dowolnie dokładnie pęd jednej oraz położenie drugiej, to można też na przykład odpowiednio dokładnie przewidzieć wynik możliwego pomiaru pędu drugiej cząstki, co oznacza, że przed pomiarem zarówno faktycznie zmierzone położenie, jak też pęd tej drugiej cząstki, który mógł zostać zmierzony, były dokładnie określone – co najmniej z dokładnością przekraczającą ograniczenie wynikające z zasady nieoznaczoności. Pojawia się więc sprzeczność, która w intencji autorów argumentu miała przemawiać przeciw interpretacji kopenhaskiej zakładającej zupełność kwantowego opisu układu.

Zastanówmy się teraz, na czym konkretnie polega paradoks w wersji Bohma argumentu EPR. Paradoks w sensie logicznym, a nie tylko psychologicznym, polega na tym, że z przyjętych założeń wyprowadza się sprzeczność. W wersji oryginalnej nie ma jednak żadnej sprzeczności w samej możliwości natychmiastowego, jednoznacznego przypisania drugiej cząstce danej składowej pędu na podstawie pomiaru tej składowej pędu pierwszej. Sprzeczność pojawiła się dopiero w związku z wynikającym z zasady nieoznaczoności zakazem równoczesnego przypisania danej cząstce z dowolną dokładnością zarówno owej składowej pędu, jak i odpowiedniej składowej wektora położenia, na podstawie dokonanego na niej pomiaru. Co więcej, sam związek między pędami cząstek nie jest nawet paradoksem w sensie psychologicznym, bo w oczywisty sposób opiera się na zasadzie zachowania pędu.

Podobnie, żadna sprzeczność nie pojawia się w wersji Bohma tylko w związku z możliwością jednoznacznego przypisania wartości rzutu spinu drugiej cząstki na dany kierunek na podstawie pomiaru rzutu spinu pierwszej na ten kierunek. Tym razem pojawia się ona w kontekście zakazu równoczesnego przypisania cząstce rzutów spinu na ów kierunek i na kierunek do niego prostopadły [Bohm, 1951, s. 615]. Natomiast sam związek rzutów spinu na ten sam kierunek znów nie jest paradoksem nawet w sensie psychologicznym, jako oparty na zasadzie zachowania momentu pędu. Paradoks w tym sensie pojawia się dopiero w związku ze statystycznymi korelacjami wyników równoczesnych, niezależnych pomiarów rzutów spinu obu cząstek na kierunki różne, ale nie wzajemnie prostopadłe. Oka-

zuje się bowiem, że rozkład prawdopodobieństwa jest taki, jak gdyby każda z cząstek natychmiast jakoś „wiedziała”, na jaki kierunek postanowiono zmierzyć rzut spinu drugiej.

Z pewnością zaskakują statystyczne korelacje między odległymi, niezależnymi pomiarami, silniejsze niż można byłoby się spodziewać. Tym jednak, czemu, jak się zdaje, poświęcono za mało uwagi, jest fakt, że te mocniejsze korelacje pozwala tu przewidzieć teoria MNIEJ deterministyczna. Przecież w fizyce klasycznej wszelkie korelacje wyników odległych pomiarów, jeśli wykluczyć oddziaływania zdalne, wynikają właśnie z determinizmu, czyli z ich zdeterminowania przez wspólną przyczynę w przeszłości. Jak więc osłabienie determinizmu może spowodować WZMOCNIENIE korelacji?

Determinizm a korelacje zdalne

Jako najważniejszą różnicę między mechaniką kwantową a fizyką klasyczną zazwyczaj wskazuje się właśnie indeterminizm, czy raczej „miękkki” determinizm, tej pierwszej. W eksperymentach badających korelacje EPR otrzymano wyniki niezgodne z przewidywaniami opartymi na „twardo” deterministycznych modelach klasycznych z parametrami ukrytymi. Być może jednak nie wzięto jeszcze pod uwagę jakiegoś sposobu konstrukcji takiego modelu, który pozwoliłby odtworzyć potwierdzone w tych eksperymentach przewidywania MK. Co więcej, tylko wtedy można byłoby mówić o parametrach w pełni UKRYTYCH – skoro przewidywania oparte na dotychczas rozważanych modelach są różne od kwantowych, a zatem, gdyby się potwierdziły, eksperymenty te pozwoliłyby właśnie odkryć obecność tych parametrów.

Przypomnijmy: korelacje kwantowe są silniejsze niż przewidywane na podstawie dotychczas rozpatrywanych modeli klasycznych. Jeśli więc przedstawione wyżej heurystyczne rozumowanie jest trafne, to modele te były za mało, a nie za bardzo deterministyczne. Ich determinizm można wzmocnić, rezygnując z lokalności i dopuszczając oddziaływania natychmiastowe na odległość. Czy jednak można uzyskać ten efekt bez tego?

Warto zastanowić się, czy w dotychczasowych rozważaniach dotyczących modeli z parametrami ukrytymi nie zasugerowano się nadmiernie interpretacją kopenhaską mechaniki kwantowej. Zgodnie z tą interpretacją, jeśli badany obiekt nie jest w jednym ze stanów własnych operatora mierzonej wielkości, to przed pomiarem wartość tej wielkości jest niezdeterminowana i aby wynik jej pomiaru był określony, musi w nim dojść do redukcji stanu obiektu do jednego ze stanów własnych operatora w wyniku jego oddziaływania z przyrządem pomiarowym. Tym samym pomiar nie odsłania własności zawczasu aktualnie posiadanej przez obiekt, lecz w zasadzie mu ją dopiero nadaje, aktualizując jedną z dostępnych możliwości [Heller, Pabjan, 2007, s. 98–99]; to jednak, którą z nich, nie jest jednoznacznie określone przez stan przed pomiarem. Sugeruje to, że wynik pomiaru jest tylko w części określony przez stan obiektu, a w części przez niekontrolowany wpływ oddziaływania z przyrządem.

W przypadku eksperymentów EPR zakłada się, że każda z cząstek ma taki sam spin całkowity, natomiast rzuty ich spinów są pierwotnie określone tylko na pewien nieznaną kierunek i mają przeciwne znaki, to znaczy są w stanach własnych operatora rzutu spinu na ten kierunek odpowiadających przeciwnym wartościom własnym tego operatora. Konieczność przewidywać statystycznych wynika z faktu, iż oba pomiary na ogół dotyczą rzutów spinów cząstek na jakiś inny kierunek niż ten, na który były określone pierwotnie, więc co najmniej w przypadku jednego z tych pomiarów, a w ogólności dla obu, w trakcie pomiaru dochodzi do redukcji stanu. Zaskakujący jest fakt, że korelacje są takie, jak gdyby wynik pomiaru na jednej cząstce sprawiał, iż rozkład prawdopodobieństwa wyników pomiaru na drugiej jest taki, jak w sytuacji, gdy przed pomiarem byłaby ona w stanie własnym operatora rzutu spinu na ten sam kierunek, na który zmierzono rzut spinu pierwszej cząstki, odpowiadającym jednak przeciwnej wartości własnej [Bell, 1964, s. 15]. Można więc odnieść wrażenie, że pomiar na jednej cząstce natychmiastowo zmienia stan drugiej.

Aby uniknąć takiego wniosku, należałoby w jakiś inny sposób wyjaśnić powstałą korelację. Jak już zauważyliśmy, z duchem interpretacji kopenhaskiej wydaje się być zgodne wyobrażenie, że wartość rzutu spinu na dany kierunek, jeśli cząstka nie jest w stanie własnym operatora rzutu

spinu na ten kierunek, jest kreowana przez oddziaływanie cząstki z aparaturą pomiarową. Mogłoby się więc wydawać, że gdyby miała istnieć jakaś deterministyczna teoria subkwantowa, to konieczność ograniczenia się na poziomie opisu kwantowego do przewidywań probabilistycznych powinna wyjaśnić nieuwzględnieniem jakiegoś aspektu tego oddziaływania, określonego za pomocą parametrów ukrytych.

Oznaczałoby to, że parametry ukryte charakteryzowałyby nie tyle stan samej cząstki, co raczej układu złożonego z niej i przyrządu. Oczywiście to samo musiałyby dotyczyć pomiaru dokonanego niezależnie na drugiej cząstce. Wynika stąd, że bez jakiegoś oddziaływania między cząstkami na odległość wynik pomiaru na żadnej z nich nie powinien zależeć od kierunku, na który mierzony jest rzut spinu drugiej. Uzasadniałoby to przyjmowane na ogół założenie, że jeśli w grę wchodzi jakieś parametry ukryte, to wynik, oprócz nich, powinien zależeć tylko od kierunku, na który rzut spinu jest mierzony na danej cząstce, natomiast zupełnie nie zależeć od kierunku, na który mierzony jest na drugiej, ani od wyniku dokonanego na niej pomiaru. Jest to tak zwany warunek lokalności Bella [Shimony, 2013; Pabjan, 2011, s. 163–165], którego przyjęcie prowadzi wprost do nierówności Bella.

Korelacja bez oddziaływań zdalnych

Kluczowa dla wyprowadzenia nierówności Bella, zarówno w jego własnej wersji, jak i w doniosłej ze względu na testy empiryczne wersji CHSH [Clauser, Horne, Shimony, Holt, 1969, s. 880–884], jest faktoryzowalność [Shimony, 1984, s. 25–45, Pabjan, 2011, s. 163] łącznego prawdopodobieństwa obu wyników pomiarów. Polega ona na możliwości przedstawienia tego prawdopodobieństwa jako iloczynu prawdopodobieństw każdego z wyników z osobna, z których żadne nie zależałoby ani od kierunku, na który mierzony jest rzut spinu drugiej cząstki, ani od wyniku tego pomiaru. Faktoryzowalność jest konsekwencją warunku lokalności Bella, który na pierwszy rzut oka wydaje się oczywistą konsekwencją założenia braku oddziaływań zdalnych. Wnikliwsza refleksja pozwala jednak zauważyć, że

składają się nań dwa warunki: niezależności każdego z prawdopodobieństw od ustawienia przyrządu do mierzenia spinu drugiej cząstki (tj. od wyboru kierunku, na który rzut jej spinu ma być mierzony) i jego niezależności od wyniku tego pomiaru [Jarret, 1984, s. 569–589].

Pierwszy z tych warunków jest niewątpliwą konsekwencją założenia lokalności przyczyn. Jego złamanie oznaczałoby bowiem, że dana cząstka w jakiś sposób „czuje” ustawienie odległego przyrządu do mierzenia spinu drugiej, co byłoby nie do pomyślenia bez jakiegoś oddziaływania zdalnego. Wynikanie drugiego warunku z tego założenia jednak nie jest już tak oczywiste. Chodzi w nim bowiem o brak statystycznej zależności wyników pomiarów, która mogłaby w jakiś sposób wynikać ze wspólnej przyczyny, jaką było oddziaływanie między cząstkami w układzie związanym, w którym pozostawały przed rozdzieleniem.

Zazwyczaj zakłada się, że jeśli w grę wchodziłyby jakieś parametry ukryte, to wynik pomiaru rzutu spinu danej cząstki współwyznaczałyby one, dookreślając stan układu złożonego z tej cząstki i przyrządu pomiarowego. Gdyby tak było, to aby pojawiła się statystyczna zależność wyników pomiarów, cząstka musiałaby jakoś „czuć” na odległość nie tylko stan drugiej cząstki, ale i zupełnie niezależny od niego stan odległego przyrządu. Dlaczego jednak nie założyć, że po rozdzieleniu stan samej cząstki, współokreślany przez zmienne ukryte, jednoznacznie wyznacza wyniki OBU pomiarów? Problem w tym, że kierunki, na które rzut spinu będzie mierzony dla poszczególnych cząstek, można wybrać dowolnie. Skąd więc cząstka miałaby z góry „wiedzieć”, na jaki kierunek rzut jej spinu będzie mierzony?

Być może kluczem do odpowiedzi na to pytanie jest rezygnacja z założenia, że parametry ukryte współdeterminują tylko wynik pomiaru rzutu spinu na ten jeden kierunek, na który będzie on na danej cząstce mierzony. Alternatywą byłoby założenie, że zdeterminowany przez nie jest wynik takiego pomiaru na KAŻDY kierunek. Z klasycznym momentem pędu tak właśnie było. Czy jednak, wobec skwantowanego charakteru spinu, nie musiałoby to oznaczać, iż spin jest skierowany we wszystkich kierunkach naraz? Interpretacja kopenhaska unika tego paradoksalnego wniosku dzięki założeniu, że jest on skierowany tylko w kierunku odpowiadającym stano-

wi własnemu operatora rzutu spinu, w którym pierwotnie jest cząstka, natomiast jego rzuty na inne kierunki to tylko potencjalności, realizowane w wyniku oddziaływania z aparaturą pomiarową.

Przy dokładniejszym przyjrzeniu się jednak widać, że przed zrealizowaniem pomiaru taki charakter ma również jego rzut na kierunek odpowiadający owemu stanowi własnemu – podobnie zresztą jak wynik pomiaru dowolnej wielkości klasycznej. Różnica polega tylko na jednoznaczności określenia tego wyniku przez stan badanego obiektu. Mogłoby ją zniwelować właśnie wprowadzenie parametrów ukrytych.

Z drugiej strony, rezygnacja z przesłanek uzasadniających założenie, że parametry ukryte wpływają na wyniki pomiarów na obu cząstkach niezależnie, nie musi oznaczać unieważnienia jego samego. Jego odrzucenie należałoby więc jakoś uzasadnić. Uzasadnienie jednak samo się nasuwa, gdy rozważyć przypadek pomiarów rzutu spinu na ten sam kierunek. W takim przypadku, znając wynik pomiaru na jednej cząstce, można jednoznacznie przewidzieć wynik pomiaru na drugiej. W świetle interpretacji kopenhaskiej dzieje się tak dlatego, że wynik pomiaru zmienia stan układu cząstek w taki sposób, iż po nim obie są w stanach własnych operatora rzutu spinu na ten kierunek. Jak ten fakt zinterpretować w ramach teorii z parametrami ukrytymi?

Otóż należałoby przyjąć, że po rozdzieleniu cząstek stan każdej z nich w aspektach istotnych ze względu na wynik pomiaru rzutu spinu jest niejako „zwierciadlanym odbiciem” stanu drugiej. Pomiar na jednej jest więc analogiczny do odpowiedniego pomiaru na drugiej, tyle że wynik jest przeciwny. Oznaczałoby to, że równoczesne pomiary na obu cząstkach w tym szczególnym przypadku faktycznie są równoważne zdublowaniu pomiaru na jednej z nich. W przypadku zaś, gdy kierunki pomiaru rzutu spinu są różne, są one równoważne wykluczonemu przez zasadę nieoznaczoności równoczesnemu pomiarowi rzutów spinu tej samej cząstki na dwa różne kierunki.

Warto zauważyć, że analogiczna równoważność pojawiła się już w oryginalnej wersji eksperymentu EPR, gdzie dotyczyła pomiarów pędu i opierała się na zasadzie zachowania pędu układu dwóch cząstek. Tu podstawą jest również zasada zachowania – mianowicie zasada zachowania

całkowitego spinu tego układu. Ona sama jednak wystarczy tylko do wyjaśnienia przypadku, gdy kierunki odpowiadające obu pomiarom pokrywają się. W pozostałych przypadkach należałoby założyć, że dodatkowo w grę wchodzi jakiś inny, na razie nieznane związki, określone przez parametry ukryte.

Przy założeniu wspomnianej równoważności szczególna korelacja wyników obu pomiarów nie tylko nie powinna zaskakiwać, ale wręcz należałoby jej oczekiwać. Rzut spinu na dany kierunek określałby pewną własność cząstki, charakteryzującą jej stan. To samo jednak dotyczyłoby jego rzutu na dowolny inny kierunek. Trudno zaś dziwić się związkom między różnymi własnościami tego samego obiektu. Jako trywialny przykład takiego związku można wskazać choćby ścisłą korelację między równobocznością i równokątnością trójkątów. Wręcz przeciwnie, tym, co powinno zaskakiwać, jest właśnie wzajemna niezależność niektórych własności przedmiotów znanych z codziennego doświadczenia.

Specyfika pomiaru kwantowego

W celu uniknięcia prawdopodobnego zastrzeżenia warto nieco uwagi poświęcić rozwinięciu stwierdzenia, iż, mimo że w teorii z parametrami ukrytymi, o jaką tu miałyby chodzić, wynik pomiaru rzutu spinu na każdy kierunek byłby zarazem jednoznacznie określony i skwantowany, nie wynikałoby stąd, że spin jest skierowany we wszystkich kierunkach naraz. Stoi za nim określona filozofia pomiaru kwantowego. Pamiętamy, że w mechanice kwantowej zakłada się, iż w wyniku pomiaru dochodzi do redukcji stanu stanowiącego superpozycję stanów własnych operatora mierzonej wielkości do jednego z tych stanów, odpowiadającego wartości własnej będącej wynikiem pomiaru. Jak wyglądałaby natura tego zjawiska z punktu widzenia poszukiwanej teorii?

Realistyczna interpretacja redukcji stanu musi oznaczać, że w takim wypadku pomiar zmienia stan obiektu, którego jedna z charakterystyk jest mierzona. Określenie „redukcja stanu” jednak jest o tyle niefortunne, że

sugeruje jakiś „okrojenie” stanu początkowego do jednego z superponujących stanów. Tymczasem będącemu jej wynikiem stanowi nic nie brakuje – jest on szczególnym przypadkiem takiej superpozycji, gdy współczynniki przy wszystkich wektorach stanów składowych poza jednym zerują się, a współczynnik przy tym jednym jest równy jedności. Chodzi więc raczej o pewne przekształcenie jednego możliwego stanu w inny.

Opis kwantowy stanu wyjściowego nie wyznacza jednoznacznie wyniku tego przekształcenia. Idea parametrów ukrytych każe zakładać, iż razem z opisem stanu przyrządu pomiarowego uzupełniają go tak, że wynik jest już wyznaczony jednoznacznie. Pamiętamy, że odeszliśmy tu od założenia, iż parametry te charakteryzują niekontrolowany aspekt oddziaływania obiektu z przyrządem; nie musi to jednak zmieniać wyobrażenia na temat natury tego procesu.

Zmianie ulega za to rola przyrządu. Następuje powrót do wyobrażenia na temat pomiaru z fizyki klasycznej. Przyrząd nie kreował tam własności, którą charakteryzuje konkretna wartość mierzonej wielkości, lecz jego rola sprowadzała się do określenia, która wielkość jest mierzona, a to, jaka jest jej wartość, było w całości zdeterminowane przez stan obiektu. Jedyna różnica, jaka się pojawia, polega na tym, że jeśli obiekt nie jest w stanie własnym operatora mierzonej wielkości, to jego stan po pomiarze różni się od stanu przed nim. Pomiar więc, podobnie jak w teorii kwantów, na ogół zmienia stan układu, którego dotyczy – z tym, że teraz zakłada się, iż wynik tej zmiany jest całkowicie zdeterminowany przez stan sprzed pomiaru, dookreślony przez parametry ukryte.

W przypadku pomiaru spinu oznacza to, że spin cząstki, sam w sobie, jest jakoś zorientowany – to znaczy jeśli zmierzyć jego rzut na pewien wyróżniony kierunek, to pomiar rozpoznaje jedynie wartość tego rzutu, nie zmieniając stanu cząstki; jeśli zaś zmierzyć go na jakiś inny kierunek, to pomiar nie tylko rozpoznaje jego wartość zdeterminowaną przez określony w sposób zupełny stan cząstki, lecz ponadto REORIENTUJE jej spin w taki sposób, by wyróżniał kierunek, na który rzut jest mierzony. Spin cząstki ma więc jednoznacznie określoną wartość rzutu spinu na każdy kierunek, nie będąc zarazem skierowany we wszystkie kierunki na raz.

Podsumowanie

Twierdzenie Bella od początku było mocno podejrzane. Nałożenie na statystyczne korelacje wyników pomiarów przewidywane przez każdą rozsądną teorię z parametrami ukrytymi ograniczenia, które przekraczają odpowiednie przewidywania mniej przecież od niej deterministycznej mechaniki kwantowej, wygląda na jaskrawą niedorzeczność. Tym niemniej, rozumowaniu, które do niego prowadzi, na pierwszy rzut oka trudno cokolwiek zarzucić. Wprawdzie w jego głównym założeniu wyodrębniono składową, która może być uznana za dyskusyjną, jednak podnoszonej w stosunku do niej wątpliwości nie uzasadniono w sposób bezdyskusyjny. Można mieć nadzieję, że tutaj udało się w końcu znaleźć dla niej zadowalające uzasadnienie.

Gdyby tak było, okazałyby się, że potwierdzające przewidywania mechaniki kwantowej testy nierówności Bella nie bardziej dowodzą nieistnienia parametrów ukrytych, niż potwierdzające przewidywania szczególnej teorii względności eksperymenty na wykrycie ruchu ziemskiego laboratorium względem eteru dowodzą nieistnienia eteru. Co więcej, nie dowodzą one nawet, że gdyby jednak parametry ukryte istniały, to odwołująca się do nich teoria musiałaby być nieodwołalnie nielokalna. Tym samym wyniki tych eksperymentów mają się nijak do tezy, jakoby z obowiązywania mechaniki kwantowej wynikało istnienie w przyrodzie budzących skojarzenia z czarną magią bezpośrednich oddziaływań na odległość.

Oczywiście samo podważenie jednego z założeń twierdzenia Bella nie wystarczy do udowodnienia jego fałszywości. Należałoby jeszcze sformułować lokalnie deterministyczną teorię z parametrami ukrytymi przekraczającą nakładane przez nie ograniczenie. Być może jednak dotychczas nie udało jej się znaleźć właśnie dlatego, iż w wyniku olśnienia argumentacją na rzecz twierdzenia Bella, prowadzącą do niej drogę systematycznie omijano.

Bibliografia

- Andersson G., (1988), *Kritik und Wissenschaftsgeschichte*, Tübingen, Mohr.
Aspect A., Dalibard J., Roger G., (1979), „Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers”, *Physical Review Letters* 49 (25).

- Aspect A., Grangier P., Roger G., (1979), „Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm *Gedankenexperiment*: a new violation of Bell's inequalities”, *Physical Review Letters* 49 (2).
- Baierlein R., (2006), „Two myths about special relativity”, *American Journal of Physics* 74 (3).
- Bell J.S., (1964), „On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox”, *Physics* 1 (3).
- Bell J.S., (1987), „How to teach special relativity”, [w:] J.S. Bell, *Speakable and Un-speakable in Quantum Mechanics*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Bocheński J., (1994), *Sto zabobonów*, wyd. 2, Kraków, PHILED.
- Bohm D., (1951), *Quantum Theory*, New York, Prentice-Hall.
- Bohm D., Aharonov Y., (1957), „Discussion of experimental proof for the paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky”, *Physical Review* 108 (4).
- Brown H.R., Pooley O., (2006), „Minkowski space-time: a glorious non-entity”, [w:] *The Ontology of Spacetime*, [ed.] D. Dieks, Amsterdam, Elsevier.
- Clauser J.F., Horne M.A., Shimony A., Holt R.A., (1969), „Proposed experiment to test local hidden-variable theories”, *Physical Review Letters* 23 (15).
- Czerniawski J., (1998), „Metodologiczne źródła kryzysu racjonalności”, [w:] *Człowiek, kultura, przemiany*, [red.] J. Plazowski, M. Suwara, Kraków, Wyd. Uniwersytetu Jagiellońskiego.
- Czerniawski J., (2000), „Fenomenologiczne rozwiązanie problemu bazy empirycznej”, *Kwartalnik Filozoficzny* 38 (4).
- Czerniawski J., (2003), „Czy przekształcenie Lorentza jest obrotem, czyli jak z dziury zrobiono górę”, *Postępy Fizyki* 54 (6).
- Czerniawski J., (2007), „Czy można żyć bez indukcji?”, *Przegląd Filozoficzny* 16 (3).
- Czerniawski J., (2009), *Ruch, przestrzeń, czas: Protofizyczne i metafizyczne aspekty podstaw fizyki relatywistycznej*, Kraków, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego.
- Czerniawski J., (2013), „Obrona protofizyki i fundamentalizmu”, *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska Sectio* 38 (1).
- Einstein A., (2005), „O elektrodynamice ciał w ruchu”, [w:] A. Einstein, *5 prac, które zmieniły oblicze fizyki*, Warszawa, Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego.
- Einstein A., Podolsky B., Rosen N., (1935), „Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?”, *Physical Review* 47.
- Grünbaum A., (1960), „The Duhemian argument”, *Philosophy of Science* 11.
- Harman G., (1965), „The inference to the best explanation”, *The Philosophical Review* 74.
- Heller M., (1996), *Mechanika kwantowa dla filozofów*, Tarnów, Biblos.
- Heller M., Pabjan T., (2007), *Elementy filozofii przyrody*, Tarnów, Biblos.
- Jarrett J.P., (1984), „On the physical significance of the locality conditions in the Bell arguments”, *Noûs* 18 (4).
- Kroes P., (1983), „The clock paradox, or how to get rid of absolute time”, *Philosophy of Science* 50.

- Kopczyński W., Trautman A., (1981), *Czasoprzestrzeń i grawitacja*, Warszawa, PWN.
- Leibniz G.W., (1969) „Polemika z Clarke’iem”, [w:] G.W. Leibniz, *Wyznanie wiary filozofa*, przeł. S. Cichowicz, PWN, Warszawa.
- Newton I., (2011), *Matematyczne zasady filozofii przyrody*, J. przeł. Wawrzycki, Kraków, Copernicus Center Press.
- Pabjan T., (2011), *Eksperymentalna metafizyka. Johna S. Bella filozofia mechaniki kwantowej*, Kraków, Copernicus Center Press.
- Pauli W., (1921), *Relativitätstheorie*, Berlin, B.G. Teubner.
- Penrose R., (2006), *Droga do rzeczywistości*, przeł. J. Przystawa, Warszawa, Prószyński i S-ka.
- Popper K.R., (1977), *Logika odkrycia naukowego*, przeł. J. Kmita, Warszawa, PWN.
- Popper K.R., (1999), *Droga do wiedzy: domysły i refutacje*, przeł. S. Amsterdamski, Warszawa, PWN.
- Shimony A., (1984), „Contextual hidden-variables theories and Bell’s inequalities”, *British Journal for the Philosophy of Science* 35.
- Shimony A., (2013), “Bell’s Theorem”, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2013 Edition), [ed.] Zalta E.N., <http://plato.stanford.edu/archives/win2013/entries/bell-theorem/> [dostęp: 1.09.2014].
- Wawrzycki J., (2011) „Wstęp”, [w:] I. Newton, *Matematyczne zasady filozofii przyrody*, przeł. Wawrzycki J., Kraków, Copernicus Center Press.
- Zahar E., (1983), „The Popper-Lakatos controversy in the light of «Die beiden Grundprobleme der Erkenntnistheorie»”, *British Journal for the Philosophy of Science* 34.

Physics and magic: on action at a distance

ABSTRACT. According to a widespread opinion, quantum theory reintroduces into physics the notion of action at a distance, which was formerly eliminated from this scientific discipline by the theory of relativity. What is more, it is claimed that this feature of quantum mechanics must be shared with any future sub-quantum theory. This claim is supported by Bell’s theorem, which in turn rests on Bell’s locality condition. Next, this condition may be reduced to two other conditions, i.e. of parameter independence and of outcome independence. It is argued that while the former is an uncontroversial consequence of locality, the latter is not only unsupported, but also unlikely to be imposed on any future theory that would be more deterministic than quantum theory.

KEY WORDS: action at a distance, quantum correlations, entanglement, Bell’s theorem, outcome independence

Jan Czerniawski, Instytut Filozofii UJ, ul. Grodzka 52, 31-044 Kraków, uczerni@cyf-kr.edu.pl