

Tadeusz PABJAN

Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych w Krakowie

KRÓTKA (PRE)HISTORIA ARGUMENTU EPR

Myślowy eksperyment Einsteina, Podolsky'ego i Rosena z roku 1935¹ z wielu względów stanowi wyjątkowo ważny epizod w całej historii sporu o poprawną interpretację mechaniki kwantowej. Doświadczenie EPR, dotyczące zachowania splątanych cząstek, pomiędzy którymi zachodzą „upiorne oddziaływania na odległość”, jest jednym z kluczowych wątków dyskusji nad możliwością uzupełnienia tej teorii o zmienne ukryte, a także nad statusem — w ramach teorii empirycznej, jaką jest mechanika kwantowa — takich pojęć, jak realizm, lokalność, czy determinizm. Twierdzenie Bella z roku 1964 w zasadniczy sposób zmieniło status eksperymentu EPR; bezpośrednio bowiem umożliwiło empiryczną realizację scenariusza, będącego do tej pory klasycznym przykładem doświadczenia myślowego (*Gedankenexperiment*), to znaczy takiego, którego w praktyce przeprowadzić nie sposób. O doniosłości pierwszych empirycznych testów nierówności Bella, opartej na scenariuszu EPR, może świadczyć to, że dosyć powszechnie zaczęto je określać mianem początku ery „eksperymentalnej metafizyki”².

Argument EPR stał się przedmiotem ogromnej ilości naukowych publikacji, w których drobiazgowym analizom poddano jego logiczną strukturę, i w których sformułowano wnioski, dotyczące roli, jaką eksperyment ze splątanymi cząstkami odgrywał i nadal odgrywa w dyskusji nad poprawną interpretacją mechaniki kwantowej. W opracowaniach tych rzadko jednakże zwraca się uwagę na to, w jaki sposób

¹ A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, „Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?”, *Physical Review*, 47 (1935), s. 777–780.

² Por. np. M.L.G. Redhead, *From Physics to Metaphysics*, Cambridge University Press, Cambridge 1995, s. 41–62.

doszło do sformułowania samego argumentu. Okazuje się, że podstawowa idea, zawarta w rozumowaniu Einsteina, Podolsky'ego i Rosena, pojawiła się już na początku lat 30-tych XX wieku i dojrzała stopniowo, krystalizowana w ogniu sporów o interpretację mechaniki kwantowej. Celem niniejszego artykułu jest przybliżenie tych epizodów tego okresu, które w największym stopniu przyczyniły się do powstania pracy EPR.

1. SPÓR O INTERPRETACJĘ ZASADY NIEOZNACZONOŚCI

Jak wiadomo, formułowanie i analizowanie eksperymentów myślowych było jednym z ulubionych elementów metody naukowej Einsteina. To właśnie przy pomocy tego typu eksperymentów twórca teorii względności przez kilka pierwszych lat po sformułowaniu mechaniki kwantowej próbował wykazywać, że teoria ta jest błędna, a następnie — gdy przekonał się, że formalizm mechaniki kwantowej nie zawiera sprzeczności — że jest niezupełna, to znaczy, że istnieją zmienne ukryte, które gwarantują możliwość realistycznego i w pełni deterministycznego opisu układów kwantowych. W swoich sporach z Bohrem i pozostałymi przedstawicielami szkoły kopenhaskiej Einstein bardzo często odwoływał się do zasady nieoznaczoności, zgodnie z którą w żadnym eksperymencie nie można zmierzyć z dowolną skończoną dokładnością wartości kanonicznie sprzężonych ze sobą obserwabli, takich jak pęd i położenie, składowe spinu cząstki, czas i energia itp. Schemat niemal każdego z myślowych eksperymentów, o których będzie mowa w dalszej części tego opracowania, w mniejszym lub większym stopniu nawiązuje właśnie do tej zasady.

Jeśli chodzi o stosunek Einsteina do zasady nieoznaczoności, to ciągle jeszcze jest on kwestią dyskusyjną. Wielu autorów opowiada się za opinią Jammera, który uważa, że po roku 1930 Einstein „w pełni zaakceptował prawdziwość relacji Heisenberga”³. Jeśli pamięta się o tym, że wiele eksperymentów myślowych — również tych, formułowanych

³M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics: the Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*, John Wiley and Sons, New York 1974, s. 166.

przez Einsteina już po roku 1930 — miało za zadanie dostarczenie kontrprzykładów, przemawiających przeciwko słuszności zasady nieoznaczoności, to staje się jasnym, że Jammer wyraźnie upraszcza całe zagadnienie. Jeśli nawet twórca teorii względności zgadzał się na to, że relacje nieoznaczoności faktycznie obowiązują w świecie przyrody, to obowiązawalność tę ograniczał on tylko i wyłącznie do obszaru praktycznych zastosowań mechaniki kwantowej. Wiele wskazuje na to, że uważał on, iż nieoznaczoność położenia i pędu — lub innych wielkości, do których stosuje się zasada Heisenberga — wynika jedynie z różnego rodzaju niedokładności i błędów, generowanych w sposób bardzo trudny lub wręcz niemożliwy do uniknięcia podczas każdego z pomiarów; nie jest zaś wewnętrzną, nieusuwalną własnością obiektów kwantowych.

Pogląd ten wiązał się u Einsteina z bardzo mocnym przekonaniem o tym, że mechanika kwantowa powinna umożliwiać w pełni realistyczny⁴ opis świata przyrody. Konsekwentne stosowanie zasady nieoznaczoności prowadzi zaś do wniosku wykluczającego tego typu opis: zgodnie z tą zasadą, nie można zmierzyć jednocześnie położenia i pędu cząstki z tego powodu, że wielkości te w każdym konkretnym przypadku po prostu *nie są* określone. Zdaniem Einsteina, wniosek ten jest nie tylko paradoksalny, ale wręcz sprzeczny wewnętrznie, i dlatego należy przyjąć, że zarówno położenie jak i pęd — a także wszystkie pozostałe pary wielkości kanonicznie sprzężonych — w każdym konkretnym przypadku są dokładnie ustalone, chociaż ich określenie z dowolną żadaną dokładnością nie zawsze jest możliwe ze względu na techniczne ograniczenia aparatury pomiarowej⁵. Niemal wszystkie eksperymenty myślowe, formułowane przez Einsteina w toku dyskusji

⁴Jak wiadomo, realizm jest pojęciem wieloznacznym. W mechanice kwantowej przez „realizm” rozumie się pogląd, zgodnie z którym wartości poszczególnych parametrów obiektów kwantowych są jednoznacznie ustalone przed momentem pomiaru.

⁵„Einstein did not doubt that Heisenberg’s Uncertainty Relations were accurate in practice [...]. Rather, he wanted to show that Heisenberg’s Δp ’s and Δx ’s were *merely* the result of (perhaps unavoidable) inaccuracies in measurement, not a sign of indeterminacies in the very *nature* of positions and momenta themselves”; K.A. Peacock, *The Quantum Revolution: A Historical Perspective*, Greenwood Press, Westport- London 2008, s. 87.

nad interpretacją mechaniki kwantowej, miały dowodzić słuszności tej ostatniej konkluzji.

Peacock zauważa, że Einstein doskonale zdawał sobie sprawę z tego, iż formalizm mechaniki kwantowej nie umożliwia jednoczesnego określenia położenia i pędu cząstki, a każda próba wykonania tego zadania będzie z konieczności prowadzić do matematycznej sprzeczności, która wcześniej czy później ujawni się w ramach formalizmu tej teorii. Problem ten nie niepokoił jednakże twórcy teorii względności:

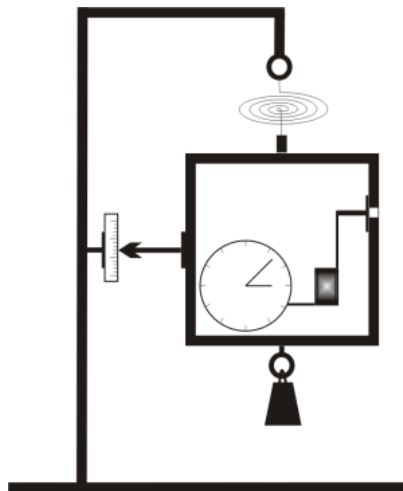
Einstein nie martwił się tym, ponieważ był przekonany, że ważniejsze jest to, by najpierw zbudować poprawny obraz fizyczny, a dopiero potem dostosować do tego obrazu formalizm [teorii]. Wiele z największych osiągnięć Einsteina miało swój początek w prostych ale zarazem eleganckich eksperymentach myślowych. W okresie tym Einstein włożył sporo wysiłku w pomyślowe poszukiwanie sposobów na wykazanie, że aparatura pomiarowa może w rzeczywistości dostarczyć więcej informacji [o układzie kwantowym], niż na to pozwalają relacje nieoznaczoności Heisenberga⁶.

Do historii mechaniki kwantowej przeszły ciągnące się całymi latami dyskusje Einsteina z Bohrem (pozostali przedstawiciele szkoły kopenhaskiej również brali w nich udział, ale głównym wyrazicielem poglądów szkoły był właśnie Bohr), w czasie których twórca teorii względności wymyślał kolejne doświadczenia, dostarczające kontrprzykładów powszechnej obowiązywalności zasady Heisenberga, a jego rozmówca każdorazowo wykazywał, że zasada ta cały czas pozostaje w mocy. Warto omówić krótko najważniejsze z tych doświadczeń, ponieważ to właśnie one stanowią interesujące świadectwo stopniowej ewolucji argumentu, któremu ostateczny kształt nadała praca EPR z roku 1935.

⁶Tamże.

2. EKSPERYMENT Z FOTONEM

Podczas szóstej konferencji Solvay'a, która miała miejsce w Brukseli w roku 1930, Einstein zaprezentował myślowy eksperyment, który miał się stać jedną z jego najstojniejszych prób podważenia słuszności zasady Heisenberga⁷. Doświadczenie to przedstawia się następująco: na odpowiednio przygotowanym do tego celu statywie zawieszony jest pojemnik z otworem, który jest otwierany i po ułamku sekundy zamykany przy pomocy specjalnego mechanizmu, połączonego z umieszczonym wewnątrz pojemnika precyzyjnym zegarem.



Schemat doświadczenia z fotonem

Zegar mierzy czas otwarcia przesłony otworu, i wykonuje to zadanie to z dowolną żądaną dokładnością. W zbiorniku zamknięty jest jeden foton, który wylatuje po otwarciu przesłony, a mechanizm zegara pozwala dowolnie dokładnie określić przedział czasu, odpowiadający temu zdarzeniu. Sam pojemnik wyposażony jest we wskaźnik, który na

⁷Jammer zauważa, że eksperyment ten stał się najważniejszym czynnikiem, stymulującym konceptualny rozwój mechaniki kwantowej na początku trzeciej dekady XX wieku, i że bezpośrednio przyczynił się do sformułowania argumentu EPR, zob. M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, dz. cyt., s. 166.

specjalnej skali wskazuje ubytek masy, spowodowany ucieczką fotonu, co — na podstawie wzoru $E = mc^2$ — umożliwił precyzyjne określenie energii tej cząstki. Zdaniem Einsteina, nie istnieją żadne obiektywne przeszkody, które — przynajmniej w zasadzie — uniemożliwiłyby przeprowadzenie obydwu tych pomiarów (energii fotonu i czasu opuszczenia przezeń zbiornika) z dowolną żadaną dokładnością. Oznacza to, że zasada Heisenberga, zgodnie z którą iloczyn nieoznaczoności obydwu tych wielkości nie może być mniejszy niż stała Plancka, nie jest w tym przypadku zachowana.

Bohr nie od razu odkrył błąd w rozumowaniu Einsteina⁸, ale ostatecznie wykazał ponad wszelką wątpliwość, że do pomiaru zarówno masy fotonu, jak i czasu otwarcia przesłony otworu pojemnika, z konieczności przypisana będzie nieoznaczoność, określona przez relacje Heisenberga. Co ciekawe, Bohr odwołał się w swoim uzasadnieniu do wzorów szczególnej i ogólnej teorii względności, wskazując na to, że na wynik obydwu pomiarów w zasadniczy sposób wpływa obecność pola grawitacyjnego, i ruch (pojemnika i umieszczonego w nim zegara) w tym polu⁹. Aby dokonać pomiaru masy pojemnika przed momentem otwarcia przesłony i po tym momencie, należy najpierw sam pojemnik poddać działaniu siły grawitacyjnej (np. zawiesić na sprężynie); ucieczka fotonu spowoduje nieznaczny ruch pojemnika — to znaczy zmianę jego położenia i pędu. Ruch pojemnika, a także sama obecność zewnętrznego pola grawitacyjnego w sposób nieunikniony wpływają również — zgodnie z relatywistycznym efektem dylatacji i zasadą

⁸“It was quite a shock for Bohr to be faced with that problem; he did not see the solution at once. During the whole evening he was extremely unhappy, going from one to the other and trying to persuade them that it couldn't be true, that it would be the end of physics if Einstein were right; but he could not produce any refutation. I shall never forget the vision of the two antagonists leaving the club: Einstein, a tall majestic figure, walking quietly, with a somewhat ironical smile, and Bohr trotting near him, very excited, inefficiently pleading that if Einstein's device would work, it would mean the end of physics. The next morning came Bohr's triumph and the salvation of physics”; L. Rosenfeld, “Fundamental Problems in Elementary Particle Physics”, *Proceedings of the Fourteenth Solvay Conference*, Interscience, New York 1968, s. 232.

⁹Zob. N. Bohr, “Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics”, w: *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, P.A. Schilpp (red.), Library of Living Philosophers, Evanston 1949, s. 220–227.

równoważności — na pomiar czasu. Co istotne, każdy z tych pomiarów będzie wiązał się z pewnym marginesem nieoznaczoności, która charakteryzuje się tym, że „wykorzystanie aparatury do precyzyjnego pomiaru energii fotonu uniemożliwi poznanie momentu jego ucieczki”¹⁰.

3. DOŚWIADCZENIE ETP

W przedstawionym epizodzie zwycięzcą okazał się Bohr. Co istotne, „Einstein został pokonany, ale nie przekonany”¹¹, i nic dziwnego, że już w następnym roku zaproponował on — tym razem wspólnie z Richardem Tolmanem i Borysem Podolsky’em (ETP) — istotną modyfikację diskutowanego eksperymentu, której celem było jego zabezpieczenie przed kontrargumentami Bohra, dotyczącymi obecności pola grawitacyjnego¹². W krótkim i pozbawionym technicznych szczegółów artykule autorzy ci przedstawili schemat „prostego idealnego doświadczenia, z którego wynika, że możliwość określenia przeszłości jednej cząstki prowadzi do niezgodnych z mechaniką kwantową predykcji, dotyczących przyszłego zachowania drugiej cząstki”¹³. Warto zauważyć, że w eksperymencie tym jest już mowa o korelacji pomiędzy cząstkami, i że właśnie to pojęcie stało się później kluczem do zrozumienia schematu doświadczenia EPR. Nic dziwnego, że Pais określa pracę, zawierającą projekt tego eksperymentu myślowego, mianem „zwiastuna artykułu Einsteina, Podolsky’ego i Rosena”¹⁴.

W doświadczeniu ETP występuje — podobnie jak to było w omawianym powyżej przypadku — pojemnik *B*, tym razem zawierający

¹⁰Tamże, s. 228.

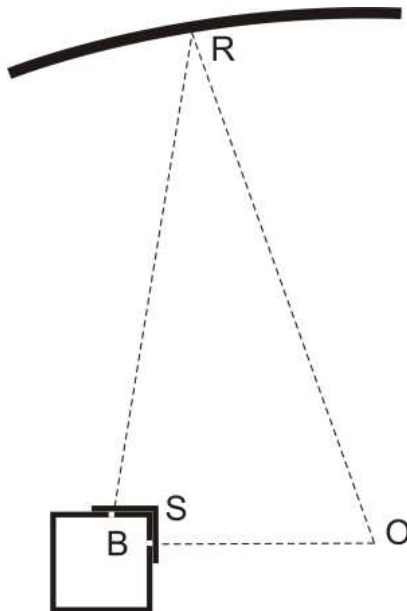
¹¹M. Jammer, „Einstein and Quantum Physics”, w: *Albert Einstein. Historical and Cultural Perspectives*, G. Holton, Y. Elkana (red.), Princeton University Press, Princeton 1982, s. 70.

¹²A. Einstein, R.C. Tolman, B. Podolsky, “Knowledge of past and future in quantum mechanics”, *Physical Review*, 37 (1931), s. 780–781. Eksperyment dotyczył pomiaru czasu, i autorzy tym razem zatroszczyli się o to, by „tempo zegara [...] nie zostało zaburzone przez efekty grawitacyjne, związane z pomiarem ciężaru pojemnika” (s. 781).

¹³Tamże, s. 780.

¹⁴A. Pais, „Einstein and the quantum theory”, *Reviews of Modern Physics*, 51 (1979), s. 903. Autor zauważa jednak, iż ze względu na błędne wnioski, zawarte w tym artykule, nie warto poświęcać mu większej uwagi.

kilka identycznych cząstek, i wyposażony w dwa otwory zamykane jedną przesłoną S , sterowaną mechanizmem, połączonym z precyzyjnym zegarem. Po otwarciu przesłony z pojemnika wydostają się dwie cząstki, z których każda porusza się w kierunku obserwatora O po innej drodze: pierwsza zmierza do niego po linii prostej, pokonując odcinek SO , druga — odbija się od wklęsłej powierzchni R i pokonuje odcinek SRO . Obserwator wyposażony jest w dokładny zegar i odpowiednie urządzenie, pozwalające na pomiar pędu cząstek, zna również odległości SO i SRO , a także masę (równoważną energii) obydwu cząstek, zmierzoną dzięki porównaniu masy pojemnika przed otwarciem przesłony i po jej zamknięciu. Przebieg eksperymentu jest następujący:



Schemat doświadczenia ETP

Obserwator O mierzy pęd pierwszej cząstki, gdy ta zbliża się po linii SO , a także czas jej przybycia. [...] znając pęd tej cząstki w przeszłości, a stąd również jej prędkość i energię, wydaje się możliwe wyliczenie czasu otwarcia przesłony na podstawie znanego czasu przybycia pierwszej cząstki, a także wyliczenie energii i prędkości drugiej cząstki na podstawie znanego ubytku

energii zawartości pojemnika po otwarciu przesłony. Wydaje się więc możliwe uprzednie określenie zarówno energii, jak i czasu przybycia drugiej cząstki — jest to wynik paradoksalny, jako że energia i czas są wielkościami, które w mechanice kwantowej nie komutują. Wyjaśnieniem tego paradoksu musi być to, że ruch pierwszej cząstki nie może być — jak zostało to założone — określony w przeszłości z dowolną dokładnością. W rzeczywistości jesteśmy zmuszeni uznać, że nie istnieje żadna metoda, która pozwalałaby zmierzyć pęd cząstki bez zmieniania wartości tego pędu¹⁵.

Jak widać, autorzy cytowanego artykułu skłaniają się ku temu, że naruszenie zasady nieoznaczoności, którego dowodzi ich eksperyment, nie musi z konieczności prowadzić do odrzucenia tej zasady; teoretycznie jest bowiem możliwe, że nieoznaczoność — znowu wbrew temu, co głosi standardowa mechanika kwantowa — przypisana jest nie tylko do pomiarów, które zostaną przeprowadzone w przyszłości, ale również do tych, które miały już miejsce w przeszłości. „Zasady mechaniki kwantowej — formułując ostateczny wniosek Einstein, Tolman i Podolsky — muszą uwzględnić nieoznaczoność opisu zdarzeń przeszłych, analogiczną do nieoznaczoności dotyczącej przewidywania zdarzeń przyszłych”¹⁶. Poprawność tej konkluzji nie jest oczywista i zapewne nie przez przypadek w kilka tygodni po publikacji artykułu ETP czasopismo *Science* przedrukowało jego treść w dodatku numeru, zawierającego pracę C.G. Darwina, w której został sformułowany dokładnie przeciwny wniosek¹⁷. Co ciekawe, artykuł Darwina zawierał propozycję kolejnej modyfikacji eksperymentu z pojemnikiem o dwu otworach — tym razem wyposażonych w dwie przesłony, działające w sposób od siebie niezależny — i był jedynie przypomnieniem doświadczenia,

¹⁵A. Einstein, R.C. Tolman, B. Podolsky, “Knowledge of past and future in quantum mechanics”, art. cyt., s. 781. Na to, że ostatnie zdanie przytoczonego cytatu jest niepoprawne, zwraca uwagę A. Pais, zob. „Einstein and the quantum theory”, art. cyt., s. 903, przyp. 87.

¹⁶A. Einstein, R.C. Tolman, B. Podolsky, “Knowledge of past and future in quantum mechanics”, art. cyt., s. 781.

¹⁷“The uncertainty principle is essentially only concerned with the future; we can install instruments which will tell us as much about the past as we like”; C.G. Darwin, „The uncertainty principle”, *Science*, 73 (1931), s. 653–660.

w oparciu o które trzy lata wcześniej A.E. Ruark wykazywał możliwość obalenia zasady nieoznaczoności¹⁸, a E.H. Kennard — dowodził jej słuszności¹⁹. Jest to wymowny dowód na to, że na przełomie drugiej i trzeciej dekady XX wieku logiczny status zasady nieoznaczoności ciągle jeszcze nie był dostatecznie jasno określony.

4. ARGUMENTY ZA NIEZUPEŁNOŚCIĄ MECHANIKI KWANTOWEJ

Około roku 1931 zmieniło się nastawienie Einsteina do mechaniki kwantowej w ogólności, i do zasady nieoznaczoności Heisenberga w szczególności. Wiele wskazuje na to, że Einstein ostatecznie przekonał się, iż formalizm teorii kwantowej jest spójny i nie zawiera żadnej sprzeczności. Nie oznacza to jednak, iż fizyk ten w pełni zaakceptował stanowisko Bohra i innych przedstawicieli szkoły kopenhaskiej: przedmiotem jego wątpliwości stała się odtąd zupełność mechaniki kwantowej. Eksperymenty myślowe Einsteina zmieniły w związku z tym swój charakter: ich podstawowym zadaniem nie było już dowodzenie sprzeczności tkwiącej w zasadzie nieoznaczoności lub w innych elementach formalizmu teorii kwantowej, ale stało się ukazywanie konieczności uzupełnienia tej teorii o zmienne ukryte. W niektórych doświadczeniach tego okresu Einstein wręcz zakładał powszechną obowiązywalność zasady Heisenberga — ale czynił to przede wszystkim po to, by uzyskać logiczny paradoks, który zmusza do wyciągnięcia wniosku o niezupełności mechaniki kwantowej.

Świadectwem zmiany w podejściu Einsteina do interpretacyjnych problemów tej teorii jest dokonana przez tego fizyka kolejna modyfikacja eksperymentu myślowego z pojemnikiem, wypełnionym fotonami. W liście datowanym na 9 lipca 1931 roku Paul Ehrenfest poinformował o tym doświadczeniu Bohra²⁰, zaznaczając, że tym razem eksperyment

¹⁸A.E. Ruark, „Heisenberg’s indetermination principle and the motion of free particles”, *Bulletin of the American Physical Society*, 2 (1927), s. 16.

¹⁹E.H. Kennard, „Note on Heisenberg’s indetermination principle”, *Physical Review* 31 (1928), s. 344–348.

²⁰Archiwum Bohra, Kopenhaga. Na temat tego listu i omawianego w nim eksperymentu myślowego Einsteina, por. M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mecha-*

myślowy Einsteina nie jest argumentem „przeciwko relacjom nieoznaczoności”, ale ma służyć „zupełnie innym celom”²¹. Ogólny schemat tego doświadczenia warto przybliżyć przede wszystkim z tego powodu, że w rzeczywistości zawiera ono w sobie główną ideę eksperymentu EPR z roku 1935.

Ehrenfest przedstawia doświadczenie Einsteina w następujący sposób: niech będzie dane urządzenie, które pełni rolę wyrzutni kwantowych pocisków. Gdy pocisk opuści urządzenie, eksperymentator przeprowadza jego inspekcję, która ma za zadanie uzyskanie informacji na temat tego, jaki będzie wynik pomiaru *albo* wielkości A (wartość a), *albo* niekomutujące z nią wielkości B (wartość b), w przypadku, gdy pomiarowi A lub B zostanie poddany pocisk, który powróci do eksperymentatora po długim czasie, odbity od odległego reflektora. Co istotne, uzyskanie tego typu predykcji musi opierać się tylko i wyłącznie na inspekcji samego urządzenia, a nie pocisku. W swoim liście Ehrenfest przedstawił Bohrowi opracowany przez Einsteina szczegółowy scenariusz, zgodnie z którym tego typu eksperyment powinien zostać przeprowadzony²², i zaznaczył, że — zdaniem Einsteina — rolę urządzenia, występującego w opisanym doświadczeniu, może pełnić pojemnik z fotonami, znany z omawianych uprzednio eksperymentów myślowych. „Pociskiem” jest w tym przypadku foton, a wielkościom A i B odpowiada energia tej cząstki i czas jej przybycia do obserwatora. Paradoks, ukryty w tym eksperymencie, polega na tym, że wydaje się możliwym precyzyjne określenie zarówno wartości a , będącej wy-

nics, dz. cyt., s. 170–173; J. Mehra, H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*, vol. 6: *The Completion of Quantum Mechanics*, Springer, New York 2001, s. 718–719.

²¹List Ehrenfesta do Bohra, 9 lipiec 1931; cytat za: M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, dz. cyt., s. 171.

²²„Set the clock’s pointer to time 0 hour and arrange that at the pointer position 1000 hours the shutter will be released for a short time interval. Weight the box during the first 500 hours and screw it firmly to the fundamental reference frame. Wait for 1500 hours to be sure that the quantum has left the box on its way to the fixed reflector (mirror), placed at a distance of ~light-year away. Now let the interrogator choose what prediction he wants: (a) either the exact time of arrival of the reflected quantum, or (b) the color (energy) of it”; List Ehrenfesta do Bohra, 9 lipiec 1931, tamże.

kiem pomiaru A , jak i wartości b , będącej wynikiem pomiaru B ²³ — pomimo tego, że wielkości A i B ze sobą nie komutują (a zatem podlegają zasadzie Heisenberga), i że decyzja o tym, którą wielkość należy zmierzyć, zostaje podjęta już po wystrzeleniu pocisku z urządzenia.

Do eksperymentu, o którym Ehrenfest informował w swoim liście Bohra, sam Einstein nawiązał podczas wykładu, dotyczącego zasady nieoznaczoności, który miał miejsce w Berlinie 4 listopada 1931 roku²⁴. Przedstawił wówczas dokładnie schemat tego doświadczenia, podkreślając, że umożliwia ono precyzyjne — choć nie jednoczesne — określenie wartości każdej z niekomutujących wielkości (energii i czasu), i że decyzja dotycząca tego, którą z dwu wielkości należy poddać pomiarowi, podejmowana jest w tym przypadku dopiero wtedy, gdy „pocisk” oddali się już na znaczą odległość od urządzenia. W czasie tego wykładu Einstein nie próbował wykazywać, że zasada Heisenberga jest niepoprawna; wyraził jedynie swój sceptycyzm wobec sytuacji, w której wynik doświadczenia wydaje się zależeć od „kaprysu” eksperymentatora, wybierającego w sposób wolny jedną z dwu wielkości, która zostanie poddana pomiarowi.

Interesujący epizod z tego okresu, świadczący o nieustannych wątpliwościach Einsteina co do statusu zasady nieoznaczoności, przytacza A. Pais. Powołuje się on na swoją korespondencję z holenderskim fizykiem, H. Casimirem²⁵, który wspomina o przebiegu sympozjum, jakie miało miejsce w Leiden na przełomie roku 1931 i 1932. Einstein wygłosił wówczas odczyt, w którym przedyskutował kilka różnych wersji eksperymentu z pojemnikiem, umożliwiającym pomiar czasu i energii cząstek. Podczas dyskusji, jaka miała miejsce po tym wykładzie, uczestnicy sympozjum doszli do wniosku, że tego typu eksperymenty

²³ „In case (a) open the still firmly screwed box and compare the lock reading (which during the first 500 hours was affected, due to the gravitational red-shift formula) with the standard time and find out the correct standard time for the pointer position „1000 hours”; then the exact time of arrival can be computed; in case (b) weigh the box again for 500 hours; then the exact energy can be determined”; List Ehrenfesta do Bohra, 9 lipiec 1931, tamże, s. 171–172.

²⁴ A. Einstein, „Über die Unbestimmtheitsrelation”, *Zeitschrift für Angewandte Chemie*, 45 (1932), s. 23.

²⁵ List z 31 grudnia 1977 roku; A. Pais, „Einstein and the quantum theory”, art. cyt., s. 903.

nie dowodzą sprzeczności ani zasady Heisenberga, ani pozostałych elementów formalizmu mechaniki kwantowej, na co Einstein miał zareagować słowami: „Wiem, że to zagadnienie jest wolne od sprzeczności, ale wydaje mi się, że zawiera ono w sobie pewną nierozumność”²⁶.

5. PROBLEM „OBIEKTYWNEJ REALNOŚCI”

Na początku roku 1932 Einstein zaczął w swoich eksperymentach myślowych analizować koncepcję, która niedługo potem miała stać się kluczową przesłanką argumentu EPR, a mianowicie „obiektywną realność” wielkości, podlegających pomiarowi. 4 kwietnia 1932 roku fizyk ten spotkał się w Rotterdamie ze swoim przyjacielem, wspomnianym już Paulem Ehrenfestem, i po raz kolejny przedyskutował z nim scenariusz eksperymentu z pojemnikiem. Następnego dnia, w liście skierowanym do Ehrenfesta, twórca teorii względności napisał, że spotkanie to skłoniło go do następującej modyfikacji diskutowanego doświadczenia: foton, opuszczający pojemnik, spotyka na swej drodze masywną cząstkę (taką jak np. proton), a obserwacja odpowiednich wielkości, charakteryzujących pierwszą z tych cząstek, pozwala określić pęd lub położenie drugiej. Co istotne, w korespondencji tej pojawia się po raz pierwszy wspomniany problem realizmu: „to właśnie z tego powodu — pisze Einstein do Ehrenfesta — skłaniam się ku temu, by przypisać obiektywną „rzeczywistość” obydwu [obserwabłom — położeniu i pędowi]”²⁷.

Modyfikacja eksperymentu, polegająca na zastąpieniu czasu i energii inną parą sprzężonych obserwabli — położeniem i pędem — najwyraźniej przypadła do gustu Einsteinowi, o czym może świadczyć kolejny epizod, który miał miejsce na jesieni roku 1933 w Brukseli. Leon Rosenfeld, którego wspomnienia zawierają opis tego wydarzenia²⁸,

²⁶Tamże. Pais tłumaczy słowa Einsteina „sie enthält meines Erachtens doch eine gewisse Härte” przez: „in my view it contains a certain unreasonableness”.

²⁷List Einsteina do Ehrenfesta z 5 kwietnia 1932 roku, cyt. za: J. Mehra, H. Reichenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*, dz. cyt., s. 719.

²⁸L. Rosenfeld, „Niels Bohr in the thirties”, w: *Niels Bohr — His Life and Work as seen by his Friends and Colleagues*, S. Rosental (red.), North-Holland, Amsterdam 1967, s. 114–137.

wyłosił wówczas wykład, dotyczący zgodności teorii pomiaru pola elektromagnetycznego z zasadą nieoznaczoności Heisenberga. Einstein wysłuchał wykładu z uwagą, ale po jego zakończeniu — nie podważając samej logiki argumentacji Rosenfelda — wyraził swój sceptycyzm, dotyczący uzasadnienia przedstawionych w wykładzie wyników. Jak zwykle w takich przypadkach, swoje analizy zwięździł on zgrabnym eksperymentem myślowym:

Wyobraźmy sobie dwie cząstki wprawione w ruch, które zbliżają się do siebie z ogromnym pędem, i oddziałują ze sobą przez bardzo krótki czas, gdy znajdują się w określonej lokalizacji. Załóżmy, że obserwator, z dala od obszaru oddziaływania tych cząstek, mierzy pęd jednej z nich. Wtedy, na podstawie warunków eksperymentu, w oczywisty sposób będzie mógł wydedukować pęd drugiej cząstki. Jeśli zaś zdecyduje się zmierzyć położenie pierwszej z nich, będzie w stanie stwierdzić, gdzie dokładnie znajduje się druga. Jest to całkowicie poprawna i zarazem bezpośrednia dedukcja z zasad mechaniki kwantowej, ale czy nie jest ona bardzo paradoksalna? W jaki sposób na ostateczny stan drugiej cząstki może wpływać pomiar, przeprowadzony na pierwszej z nich, po tym, jak ustają pomiędzy nimi jakiegokolwiek fizyczne oddziaływania?²⁹

Rosenfeld zaznacza, że Einstein wydawał się traktować przedstawiony powyżej eksperyment myślowy tylko i wyłącznie w kategoriach „ilustracji niezwykłych cech mechaniki kwantowej”³⁰ — pomimo tego, że nosi on wszelkie znamiona paradoksu, stawiającego pod znakiem zapytania spójność kopenhaskiej interpretacji tej teorii. Co warte podkreślenia, schemat przywołanego eksperymentu świadczy o tym, że już w roku 1933 Einstein zaczął modyfikować swoje doświadczenia myślowe w kierunku, wyznaczonym przez napisaną dwa lata później pracę EPR, dotyczącą dwu odseparowanych przestrzennie cząstek, które na skutek uprzedniego oddziaływania wydają się w natychmiastowy sposób wymieniać sygnały fizyczne.

Interesującym świadectwem ewolucji omawianego w tej publikacji eksperymentu myślowego Einsteina — ewolucji prowadzącej od

²⁹Tamże, s. 127–128.

³⁰Tamże, s. 128.

pierwszych idei, dotyczących pojemnika z pojedynczym fotonem, do doświadczenia EPR, w którym nie ma już mowy o pojemniku, ale o dwu oddziałujących ze sobą cząstkach — jest list, jaki twórca teorii względności napisał do Paula Epsteina w listopadzie roku 1945³¹. Einstein szczegółowo przedstawia w nim kolejne transformacje, jakim na przestrzeni kilku lat podlegała jego idea, zaznaczając, że rolę zawieszzonego w polu grawitacyjnym pojemnika ostatecznie przejęła druga z cząstek, występujących w schemacie eksperymentu EPR z roku 1935. Niewykluczone, że istotną rolę w eliminacji pojemnika i zastąpieniu go drugą z cząstek odegrał Karl Popper, a dokładniej — przeprowadzona przez niego krytyka zasady nieoznaczoności³². Popper próbował wykazać, w oparciu o zasady zachowania, że badając trajektorię jednej z dwu cząstek, które ze sobą kolidowały, można z dowolną dokładnością wnosić o trajektorii drugiej z nich. Einstein wykazał błąd w rozumowaniu Poppera, odwołując się nie do czego innego, ale właśnie do zasady nieoznaczoności: aby ustalić trajektorię (pęd i położenie) jednej z cząstek, należałoby najpierw zmierzyć jednocześnie czas i energię drugiej z nich, co — zgodnie z zasadą Heisenberga — nie jest możliwe. Popper uznał swoją pomyłkę³³, ale — zauważa Jammer — można przypuszczać, że to właśnie ta „pomyłka” przyczyniła się do ustalenia ostatecznego kształtu argumentu EPR: Popper analizował bowiem sytuację, w której dwie cząstki oddziałują ze sobą, a następnie oddalają się od siebie, i pomiar przeprowadzony na jednej z nich pozwala uzyskać informację o drugiej³⁴. Dokładnie ten sam schemat został później wykorzystany w pracy Einsteina, Podolsky’ego i Rosena.

³¹Na temat tego listu, zob. M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, dz. cyt., s. 173–174.

³²K.R. Popper, „Zur Kritik der Ungenauigkeitsrelationen”, *Die Naturwissenschaften*, 22 (1934), s. 807–808. Dokładną analizę tej pracy przeprowadza M. Jammer, zob. *The Philosophy of Quantum Mechanics*, dz. cyt., s. 174–178.

³³Zob. K.R. Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics*, Routledge, London-New York 2000, s. 15.

³⁴„It is not impossible that it was precisely this „mistake” which prompted Einstein (who immediately recognized the error) to publish, together with Podolsky and Rosen, the argument against the completeness of quantum mechanics”; M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, dz. cyt., s. 174.

Historia paradoksu EPR dostarcza istotnego argumentu za tym, że zarówno wielkie naukowe idee, jak i eksperymenty o przełomowym znaczeniu dla późniejszego rozwoju danej dziedziny — zwłaszcza fizyki — bardzo rzadko rodzą się od razu w gotowej postaci. Historia ta jest również interesującym przyczynkiem do dyskusji nad racjonalnością nauki jako takiej. Wielkie idee podlegają najczęściej długiej ewolucji, stymulowanej — wbrew temu, co głoszą ekseternalizm — nie tyle przypadkowymi czynnikami o charakterze socjologicznym czy historycznym, ale merytoryczną wymianą argumentów pomiędzy uczonymi, i rzeczową dyskusją nad zasadnością i trafnością kolejnych modyfikacji pierwotnej koncepcji. Bardzo często dopiero z perspektywy czasu można odkryć wewnętrzną logikę, charakteryzującą stopniowe dojrzewanie idei, która tylko na pozór jawi się szczęśliwym przebłyśkiem geniuszu danego naukowca, ale która w rzeczywistości jest jedynie końcowym etapem długiego procesu, zakończonego ostatecznym sformułowaniem danej koncepcji. Nie ulega wątpliwości, że przedstawiona w niniejszym opracowaniu ewolucja argumentu EPR potwierdza tę prawidłowość.

SUMMARY

SHORT (PRE)HISTORY OF THE EPR ARGUMENT

The 1935 thought experiment of Einstein, Podolsky and Rosen is one of the most important episodes in the history of the dispute about the correct interpretation of quantum mechanics. The present paper deals with the origin of the EPR paper and discusses some other thought experiments that preceded the formulation of the Einstein-Podolsky-Rosen argument. Special attention is paid to the evolution of a simply photon-box experiment, which was devised by Einstein in 1930 and then modified by him several times before 1935. It is argued that the scheme of the original EPR argument is in fact contained in these few seminal experiments.