

Wojciech P. Grygiel

Rogera Penrose'a koncepcja mechaniki kwantowej

W swoich wykładach z fizyki, znany amerykański fizyk i laureat nagrody Nobla, Richard P. Feynman, stwierdza, iż „nikt nie rozumie mechaniki kwantowej”. Opinia ta wydaje się jednak o tyle dziwna, że w dniu dzisiejszym nikt nie śmie kwestionować osiągnięć mechaniki kwantowej oraz jej niebywalej zgodności z eksperymentem. Czerpanie zatem na ślepo niebanalnych korzyści z czegoś co ma stanowić niezrozumiały twór może słusznie wydawać się przedsięwzięciem nader ryzykownym. Nie da się jednak ukryć, że odmienność oraz intuicyjna obcość obrazu świata w mechanice kwantowej ma prawo powstrzymać nawet najwytrwalszych badaczy przed próbami konstruowania jakichkolwiek jego przedstawień. W takim duchu niewątpliwie pozostaje cały nurt interpretacyjny mechaniki kwantowej, określany jako *interpretacja kopenhaska*¹. Orzeka on, iż nie istnieje żadna rzeczywistość kwantowa a cały aparat matematyczny teorii służy jedynie obliczaniu prawdopodobieństw otrzymania wartości mierzonych obserwabli. Skoro nie można wskazać odpowiednich pojęć do opisu świata kwantowego to dlaczego fizycy (i nie tylko) bez większych oporów „zonglują” cząstkami elementarnymi i atomami? Chyba nie chodzi tutaj tylko o szacunek dla greckich atomistów! Czy można zatem mówić o czymś takim jak rzeczywisty stan kwantowy?

Interpretacja kopenhaska staje się akceptowalna dopóki do mechaniki kwantowej podchodzi się, jak to określa Chris Isham, czysto

¹ W. Heisenberg, *Physics and Philosophy*, New York: Harper Brothers Publishers 1958, 44–58.

pragmatycznie, skupiając całą uwagę badawczą jedynie na pomiarze. Wątpliwości słusznie narastają w momencie, kiedy za istotne uzna się poglądy Johanna von Neumanna, że formalizm kwantowy powinien stosować się nie tylko do świata mikro ale powinien obowiązywać dla całej fizyki. Na takim założeniu opiera się interpretacja mechaniki kwantowej przy użyciu spójnych historii kwantowych². Jeżeli nie założy się zatem jakiejś przynajmniej przybliżonej rzeczywistości na poziomie kwantowym to trudno oczekiwać, aby rzeczywistość makroskopowa była precyzyjnie określona. W opinii większości fizyków, założenie to stanowi podstawę funkcjonowania nauki i jednocześnie sygnalizuje, iż interpretacje mechaniki kwantowej mogą być źródłem istotnych problemów metodologicznych.

Ze względu na relację w stosunku do obiektywnie istniejącej rzeczywistości, interpretacje mechaniki kwantowej dzieli się na dwie grupy: (a) *antyrealistyczne* – wykluczające realność stanów kwantowych (interpretacja kopenhaska), (b) *realistyczne* – dopuszczające taki lub inny model świata kwantowego³. W grupie interpretacji realistycznych zachodzi jednak bardzo istotne rozróżnienie *mierzalności* stanów kwantowych. Rozstrzyga ono bowiem o tym, dana eksperymentalna, otrzymana w wyniku pomiaru na układzie kwantowym, odzwierciedla prawdziwy stan układu czy też jej uzyskanie wiąże się z jakąś formą oddziaływania z mikroskopowym stanem kwantowym. Do pierwszej grupy interpretacji realistycznych zalicza się teoria zmiennych ukrytych Davida Bohma, która *de facto* sprowadza mechanikę kwantową do opisu klasycznego, gdzie prawdopodobieństwo ma charakter jedynie epistemologiczny⁴. Druga grupa interpretacji realistycznych, której naczelnym przedstawicielem jest Roger Penrose, suponuje istnienie obiektywnego procesu redukcji wektora falowego $\mathbf{R}$, który w wy-

² R. Griffiths, Consistent Histories and the Interpretation of Quantum Mechanics, *J. Stat. Phys.*, 36 (1984) 219.

³ Ch. Isham, *Lectures on Quantum Theory: Mathematical and Structural Foundations*, 79 et sqq.

⁴ D. Bohm, A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables, I and II, *Physical Review* 85 (1952) 166–193.

niku oddziaływania stanu kwantowego z układem pomiarowym, prowadzi do wyselekcjonowania jednego stanu czystego z kombinacji liniowej takich stanów, jaką stanowi każdy realny stan kwantowy. W rezultacie, wartość obserwabli dla tak wybranego stanu, jest otrzymanym wynikiem pomiaru ale oryginalny stan kwantowy pozostaje *niemierzalny*. Podejście takie znajduje już obecnie swoje potwierdzenie eksperymentalne w bardzo sprytniej wersji eksperymentu Sterna–Gerlacha, przeprowadzonego na fotonach przez Alaina Aspecta i jego współpracowników⁵. Dowodzi ono poprawności opisu realnych stanów kwantowych za pomocą funkcji falowej, będącej superpozycją czystych stanów własnych. Nie ulega wątpliwości, iż zagadnienia te posiadają swoją doniosłość filozoficzną ponieważ nie dotyczą one szczegółowych własności materii ale odnoszą się do struktury rzeczywistości mikroskopowej jako całości. Co więcej, Roger Penrose nie waha się określić różnych interpretacji mechaniki kwantowej mianem związanych z nimi *ontologii* bez względu na to, czy suponują one istnienie jakiejś rzeczywistości kwantowej czy też nie⁶. Najwyraźniej jest tu zatem mowa o ontologii teorii fizycznej w sensie Quine’a, która zakłada jedynie istnienie bytów, koniecznych dla zachowania spójności teorii.

Niniejsza praca jest próbą przedstawienia koncepcji – interpretacji mechaniki kwantowej, jaką proponuje Roger Penrose ze szczególnym uwzględnieniem jej filozoficznych implikacji. Jak zresztą przyznaje sam autor, wiele jej aspektów – a w szczególności proponowany mechanizm redukcji wektora falowego – pozostają jeszcze w sferze spekulacji. Interpretacja ta postrzegana jest przez większość fizyków jako kontrowersyjna głównie z powodu, że nie traktuje ona mechaniki kwantowej jako teorii zupełnej. Zgodnie z hegemonią kopenhaską, której głównym filarem byli Niels Bohr oraz Werner Heisenberg, mechanika kwantowa uważana była za teorię

⁵ A. Aspect, P. Grangier, Experiments on Einstein–Podolsky–Rosen–type correlations with pairs of visible photons, in: R. Penrose, C.I. Isham (ed.), *Quantum Concepts in Space and Time*, Oxford: Oxford University Press 1986.

⁶ R. Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, New York: Alfred A. Knopf 2005, 782 et sqq.

zupełną ponieważ funkcji falowej układu przypisywano zawieranie całej wiedzy, dostępnej o danym układzie. Dodatkowo jeszcze, doskonała zgodność przewidywań teoretycznych mechaniki kwantowej z eksperymentem utwierdza w przekonaniu, iż mechanika kwantowa posiada kształt ostateczny i jedynym dopuszczalnym zabiegiem jest ciągle ulepszanie interpretacji. W tej materii znane jest stwierdzenie twórcy interpretacji historii kwantowych, Roberta Griffithsa, że jest to „Copenhagen done right” (ang. interpretacja kopenhaska „robiona” poprawnie). Sugestie Penrose'a nie są jednak próbą dziecinnej zabawy z mechaniką kwantową, ale wyrastają z pewnego ogólniejszego obrazu, jaki stanowią wysiłki unifikacyjne, zmierzające do zaproponowania teorii kwantowej grawitacji, łączącej mechanikę kwantową oraz ogólną teorię względności. Kontrowersyjność stanowiska Penrose'a wyraża się głównie w tym, iż o ile wysiłki te stanowią jeden z najistotniejszych nurtów współczesnej fizyki, o tyle nie wszyscy podzielają opinię Penrose'a, iż kompromisu należy szukać po stronie mechaniki kwantowej a nie ogólnej teorii względności.

Procedury Kwantowe U i R

Podstawowym zagadnieniem, w którym ogniskują się zdecydowana większość wysiłków interpretacyjnych mechaniki kwantowej jest *problem (paradoks) pomiaru*. Traktując rzecz poglądowo nie trudno zauważyć następujący kontrast: każdy złożony system kwantowy opisywany jest przy pomocy superpozycji pewnej liczby stanów własnych, natomiast pomiar, dokonany przy użyciu urządzenia makroskopowego, zawsze dostarcza jednej danej eksperymentalnej. W tym zakresie można wyróżnić dwa kierunki interpretacyjne. Pierwszy z nich, reprezentowany przez interpretacje wywodzące się z nurtu koncepcji „wieloświatowych”⁷, zdąża do zneutralizowania problemu pomiaru poprzez postawienie go na równi z wszystkimi innymi zdarzeniami kwantowymi w ramach forma-

⁷ B. DeWitt, N. Graham, *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton: Princeton University Press 1973.

lizmu, opisującego pełne sekwencje takich zdarzeń (np. interpretacja *spójnych historii kwantowych*). Problem pomiaru przestaje wówczas istnieć. Nie stanowi to jednak żadnej istotnej modyfikacji w podstawowych założeniach teorii. W drugim podejściu, problem pomiaru ulega *obiektywizacji*, to jest, nie traktuje się go jedynie jako abstrakcyjny zabieg matematyczny redukcji wektora falowego ale jako realnie zachodzący proces fizyczny. Taką strategię obiera Roger Penrose. Widać tutaj wyraźnie znaczenie uznania realności stanów kwantowych, ponieważ nie sposób mówić o jakiegokolwiek obiektywizacji pomiaru o ile wcześniej nie założy się, iż dotyczy on realnie istniejącej rzeczywistości kwantowej, choć jej własności wcale nie muszą pokrywać się z tymi, jakimi charakteryzuje się świat makroskopowy.

Roger Penrose wyróżnia w mechanice kwantowej dwie radykalnie różne i w pewnym sensie uzupełniające się procedury: (1) procedura **U** *deterministycznej, odwracalnej i liniowej* ewolucji wektora falowego $|\Psi\rangle$ zgodnie z równaniem Schrödingera, zależnym od czasu:

$$i\hbar \frac{\delta}{\delta t} |\psi\rangle = \hat{\mathbf{H}} |\psi\rangle,$$

gdzie

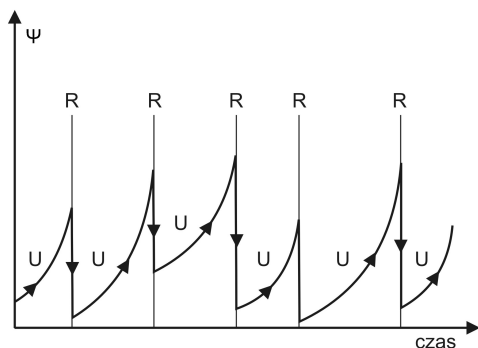
$$|\psi\rangle = \sum_{i=1}^N c_i |\mathbf{i}\rangle$$

a c_i stanowi zespoloną amplitudę prawdopodobieństwa znalezienia układu w stanie własnym $|\mathbf{i}\rangle$. Oznaczenie procedury jako **U** wywodzi się z faktu, iż operator Hamiltona $\hat{\mathbf{H}}$, występujący w powyższym równaniu jest operatorem unitarnym⁸. Wektor falowy układu kwantowego $|\Psi\rangle$ ewoluuje zgodnie z procedurą **U** dopóki nie zostanie na nim dokonany pomiar lub, mówiąc szerzej, nie wejdzie w kontakt z dowolnym urządzeniem makroskopowym. Ewolucja ta jest ściśle deterministyczna i odwracalna i nie zawiera w sobie

⁸ Operatory (macierze) unitarne odgrywają ważną rolę w fizyce ponieważ stanowią grupę transformacji, względem której podstawowe elementy teorii takie jak kąty oraz długości wektorów pozostają niezmiennicze.

żadnych elementów probabilistycznych. Co więcej, czas w mechanice kwantowej nie jest zmienną (obserwablą), posiadającą odnośny operator, ale jest nieskwantowanym parametrem, całkowicie odwracalnym tak, jak ma to miejsce w teoriach fizyki klasycznej.

W momencie, kiedy układ kwantowy zaczyna oddziaływać z makroskopowym urządzeniem pomiarowym, ewolucja ta załamuje się z uwagi na fakt, iż do głosu dochodzi procedura (2) – redukcji wektora falowego **R**. W odróżnieniu od procedury **U**, procedura **R** jest *indeterministyczna*, *nieodwracalna* oraz *nieliniowa* (zwraca uwagę negacja trzech własności procedury **U**). Oznacza to bowiem, iż tylko w momencie uruchomienia procedury **R** dochodzi do głosu prawdopodobieństwo kwantowe (*indeterminizm*) a układ traci pamięć o tym, z jakiego stanu kwantowego się wywodzi (*nieodwracalność*). Z punktu widzenia formalizmu kwantowego, procedura **R** selekcjonuje i wzmacnia do poziomu klasycznego jeden ze stanów własnych, wchodzących w skład superpozycji funkcji własnych, opisującej rzeczywisty stan układu złożonego. Selekcja następuje zgodnie z regułami obliczania prawdopodobieństwa znalezienia układu w jednym ze stanów własnych: $p_i = |c_i|^2$. Pełna ewolucja układu kwantowego z uwzględnieniem procesów pomiarowych będzie zatem szeregiem przemienne występujących procedur **U** i **R** tak jak to uwidoczniono na rysunku.



Układ powraca do unitarnej ewolucji $\mathbf{U}$ natychmiast po dokonaniu na nim pomiaru, opisywanego procedurą $\mathbf{R}$. W wyniku działania tej procedury następuje, jak to określa Penrose, wzmocnienie efektów kwantowych do poziomu klasycznego i to pociąga za sobą konieczność zmiany reguł ewolucyjnych funkcji falowej. Zjawisko to coraz częściej określa się mianem *emergencji* świata makroskopowego ze struktur kwantowych. Penrose słusznie zauważa filozoficzną doniosłość tego zjawiska mówiąc, że: „fizyków najbardziej interesuje deterministyczny proces $\mathbf{U}$, natomiast filozofowie są z reguły zaintrygowani indeterministyczną *redukcją wektora stanu* $\mathbf{R}$ ”⁹.

Nie ulega wątpliwości, iż oczywista niekompatybilność obydwu dyskutowanych procedur jest podstawowym źródłem interpretacyjnych problemów mechaniki kwantowej. Nie wiadomo bowiem jak w oparciu o standardowe reguły mechaniki kwantowej można by przybliżyć procedurę $\mathbf{R}$ przy pomocy wystarczająco złożonej procedury $\mathbf{U}$. Liniowe równanie Schrödingera stosuje się tylko dla unitarnej ewolucji $\mathbf{U}$ i nic nie mówi ono o mechanizmie redukcji wektora falowego. W rezultacie załamuje się całkowicie stosowność równania Schrödingera do procesów kwantowych, uwzględniających proces pomiaru. Co więcej, w takich warunkach występuje brak precyzyjnego określenia warunków eksperymentalnej weryfikacji mechaniki kwantowej¹⁰. Tymczasem, jak stwierdza Penrose, „obie procedury $\mathbf{U}$ i $\mathbf{R}$ są konieczne do uzyskania wspaniałej zgodności mechaniki kwantowej z doświadczeniem”¹¹. Nie ulega zatem wątpliwości, iż jeżeli nie przyjmie się taktyki neutralizacji problemu pomiaru (redukcji wektora falowego) w mechanice kwantowej, należy dokonać jego *obiektywizacji*, to jest, wskazać na fizyczne przyczyny, dzięki którym redukcja wektora falowego może zachodzić.

⁹ R. Penrose, *Nowy umysł cesarza*, Warszawa: PWN 2000, 281.

¹⁰ R. Omnes, Consistent interpretations of quantum mechanics, *Reviews of Modern Physics* 64 (2) 1992, 339–382.

¹¹ R. Penrose, *Nowy umysł cesarza*, Warszawa: PWN 2000, 282.

W swoim monumentalnym dziele, zatytułowanym *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Robert Penrose poświęca obszerny rozdział krytyce różnych interpretacji — *ontologii kwantowych* — ze szczególnym uwzględnieniem nieadekwatności sposobu w jaki traktują one zagadnienie pomiaru i redukcji wektora falowego. Przykładowo wydawać by się mogło, że jedynym przypadkiem, zapewniającym całkowitą stosowalność procedury **U** do wszystkich procesów kwantowych jest model „wieloświatowy” w którym różne możliwe wyniki wartości obserwabli, zadane wektorami falowymi, wchodzącymi w skład superpozycji stanów własnych, istnieją równocześnie w różnych światach. Wysoce problematyczna pozostaje jednak kwestia dlaczego człowiek zdolny jest do świadomego postrzegania tylko pojedynczego wyniku pomiaru. Penrose wyraża się zdecydowanie sceptycznie w stosunku do uznawanego powszechnie za potwierdzone zjawiska *dekoherencji*¹². Istotnie, nie można wykluczyć, iż redukcja wektora falowego związana jest z silnym oddziaływaniem badanego systemu kwantowego z otoczeniem (np. urządzeniem pomiarowym), prowadząc w ten sposób do wygaszenia interferencji kwantowych i w efekcie do *emergencji* świata klasycznego z poziomu kwantowego. Dekoherencja nie określa jednak w pełni przyczyny zachodzenia redukcji wektora falowego ponieważ nie stwierdza co jest ostatecznym powodem tak silnego sprzężenia pomiędzy pojedynczym układem kwantowym a makroskopowym otoczeniem. Z tego też powodu, Roger Penrose mówi o dekoherencji jedynie jako o pewnym praktycznym zabiegu (ang. FAPP – *for all practical purposes*)¹³. Tak czy inaczej, obiektywizacja redukcji wektora falowego, niosąca w sobie dość niepopularne wśród fizyków założenie o realności stanów kwantowych, stanowi właściwą podstawę Penrose'a wizji mechaniki kwantowej. To jednak, czy obiektywizacja ta będzie miała

¹² H. D. Zeh, *Found. Phys.*, 1 (1970) 69. Zob. także

¹³ R. Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, New York: Alfred A. Knopf 2005, 802.

swoje miejsce wewnątrz istniejącej teorii będzie przedmiotem osobnej dyskusji.

Realizm Funkcji Falowej

Zagadnienie realizmu w mechanice kwantowej nie jest czymś nowym. Było ono bowiem przedmiotem znanej kontrowersji jaka pojawiła się w latach trzydziestych ubiegłego stulecia pomiędzy Albertem Einsteinem i Nielsem Bohrem. Choć w ścisłym ujęciu dotyczyła ona zagadnienia *kompletności* mechaniki kwantowej, uczyniła ona także niezwykle żywym zagadnienie *realności* opisu kwantowego. Jako fizyk, przywiązujący wielką wagę do eksperymentu, Albert Einstein z najwyższą ostrożnością odnosił się do opisu stanu kwantowego przy pomocy superpozycji funkcji falowych, sugerującej możliwość istnienia własności nielokalnych stanów splątanych¹⁴. Traktując możliwość oddziaływań nielokalnych jako paradoks (słynny paradoks Einsteina–Podolskiego–Rosena (EPR)), Einstein żądał, aby każda teoria fizyczna była *lokalna* (niezmiennicza względem transformaty Lorentza) oraz *realna* (każda otrzymana wartość obserwabli musi odpowiadać realnemu stanowi w badanym układzie). Skoro ze względu na nielokalność opis kwantowy nie przystaje do pojmowanej na sposób klasyczny rzeczywistości, Einstein uznał mechanikę kwantową za teorię niekompletną oraz wskazał na konieczność istnienia zmiennych *ukrytych*, umożliwiających należne dopełnienie opisu kwantowego. Takiemu stanowisku sprzeciwiał się Niels Bohr, który uważał funkcję falową za wyczerpujące źródło informacji o badanym układzie. Problem realności oraz lokalności w teoriach fizycznych znalazł swoje rozwiązanie w pracach angielskiego matematyka Johna Bella¹⁵. Wykazał on bowiem, iż żadna teoria, opisująca zjawiska kwantowe nie może być

¹⁴ A. Einstein, B. Podolski, N. Rosen, Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?, *Physical Review* 47 (1935) 777–780.

¹⁵ J. S. Bell, On the Einstein–Podolsky–Rosen Paradox, *Physics* 1 (1964) 195 – 200.

jednocześnie realna oraz lokalna dając w ten sposób impuls do ponownego spojrzenia na wzajemne relacje pomiędzy formalizmem kwantowym a rzeczywistą strukturą świata na poziomie mikro.

Realizm funkcji falowej, opisującej stan kwantowy cząstki stanowi kolejny, istotny wyznacznik wizji mechaniki kwantowej, prezentowanej przez Rogera Penrose'a. Penrose stoi bowiem na stanowisku, iż funkcja falowa odzwierciedla realnie istniejącą rzeczywistość na poziomie kwantowym a nie jest tylko matematycznym narzędziem, zawierającym maksymalną informację o badanym układzie. Aby właściwie zrozumieć jego znaczenie, należy cofnąć się do słynnego eksperymentu Younga w którym wiązka światła, przepuszczana przez dwie szczeliny daje charakterystyczny obraz interferencyjny, złożony z okresowo przechodzących w siebie jasnych i ciemnych prążków. Eksperyment ten odegrał doniosłą rolę w potwierdzeniu dualizmu korpuskularno-falowego światła. Fundamentalne pytanie jakie w kontekście tego eksperymentu się pojawia dotyczy rozstrzygnięcia czy pojedynczy foton, który zgodnie ze swymi własnościami falowymi daje obraz interferencyjny, może przechodzić poprzez dwie szczeliny jednocześnie.

Zdecydowana większość podręczników mechaniki kwantowej operuje pojęciem prawdopodobieństwa (ściśle biorąc jego gęstości), zdefiniowanym zgodnie z postulatem Borna jako kwadrat modułu amplitudy funkcji falowej $|\Psi|^2$. Model fizyczny, który towarzyszy takiemu rozumieniu tego zjawiska zakłada, że cząstka kwantowa zawsze zajmuje określone miejsce w przestrzeni, którego nie można jednak precyzyjnie określić. Z tego powodu operuje się pojęciem gęstości prawdopodobieństwa znalezienia elektronu w danym punkcie przestrzeni. W takim podejściu foton nie może jednak ulec rozbiciu – koniecznym jest założenie, iż przechodzi przez jedną lub przez drugą szczelinę. Nie pokrywa się to z wersją eksperymentu Younga, zmierzającą do ustalenia przez którą szczelinę foton rzeczywiście przeszedł. Ustawienie detektora w jednym z ramion układu powoduje zanik obrazu interferencyjnego, będącego efektem badanego zjawiska kwantowego.

Swoją analizę powyższego problemu Roger Penrose proponuje rozpocząć od zauważenia, że w opisie kwantowym doświadczenia Younga, każdej z obydwóch dróg przebiegu fotonu przypisuje się kwantową amplitudę prawdopodobieństwa, która jest liczbą zespoloną. W konsekwencji zmiany intensywności na ekranie oblicza się sumując amplitudy prawdopodobieństw a nie prawdopodobieństwa. Obliczenie prawdopodobieństwa stanowi zgodnie z analizą przedstawioną w poprzednim paragrafie przejście do poziomu klasycznego! W momencie zatem, kiedy z obrazem kwantowym, operującym superpozycją dwóch stanów – dwóch dróg przebiegu fotonu:

$$|\Psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$$

zwiąże się konkretną rzeczywistość fizyczną, wówczas jej własności odbiegają drastycznie od tych, do których ludzkie zmysły są przyzwyczajone na bazie zdroworozsądkowego postrzegania świata fizyki klasycznej. Jeżeli rzeczywiste położenie fotonu w doświadczeniu Younga jest zadane funkcją falową, będącą złożeniem dwóch dróg to nie da się uniknąć konkluzji, iż foton poruszał się po obydwóch drogach równocześnie. Oznacza to, że cząstka kwantowa nie znajduje się w jednym punkcie ale posiada pewną *rozciągłość przestrzenną*. Funkcja falowa $|\Psi\rangle$ w powyższym równaniu posiada dwa maksima, odpowiadające poszczególnym szczelinom co oznacza, iż cząstka kwantowa może znajdować się w dwóch miejscach jednocześnie nawet, gdy te są od siebie znacznie oddalone. Zaakceptowanie zatem faktu, iż rzeczywistość kwantowa opisywana jest przez superpozycje funkcji falowych prowadzi bezpośrednio do konkluzji, iż na poziomie kwantowym istotną rolę odgrywa *nie-lokalność*.

W takich warunkach dochodzi do załamania się geometrii czasoprzestrzeni ponieważ w tak zinterpretowanej mechanice kwantowej nie można rozważać przestrzeni jako zbioru oddzielnych punktów. Koniecznym jest zatem wykorzystanie nowych struktur matematycznych (np. geometrie nieprzemienne), potrafiących odwzorowywać sytuacje, w których nie funkcjonuje klasyczna czasoprzestrzeń.

Zagadnienia te pozostają jednak poza zasięgiem niniejszej publikacji.

Na podstawie przedstawionej powyżej analizy widać wyraźnie, iż koncepcja mechaniki kwantowej, sugerowana przez Rogera Penrose'a jest swoistym ucieleśnieniem tego, co Einstein nazwał w superpozycji funkcji falowej „spooky”. Chodzi bowiem o nadanie obiektywnego statusu zjawisku *nielokalności*, które jest podstawową cechą rzeczywistości fizycznej na poziomie kwantowym. To co zatem Einsteinowi wydawało się być niekompletnym, stało się eksperymentalnie potwierdzonym opisem stanu faktycznego. Z jednej strony życzenie Einsteina, aby za formalizmem kwantowym stała konkretna rzeczywistość ulega w koncepcji Penrose'a spełnieniu. Z drugiej jednak strony, rzeczywistość ta jest niemierzalna, to jest, dana eksperymentalna otrzymana w wyniku pomiaru na układzie kwantowym nie odzwierciedla faktycznego stanu rzeczy świata kwantów. Zamykając zatem koncepcję Penrose'a w lapidarnym określeniu należy stwierdzić, iż świat kwantowy jest *realny* ale jest *niemierzalny*. Trudno przewidzieć, czy Albert Einstein dopuszczał w swoich dociekaniach takie rozwiązanie ale byłoby ono i dla niego z pewnością niezwykle intrygujące. Warto również zauważyć, iż propozycja Penrose'a nie eliminuje problemu niekompletności mechaniki kwantowej. Choć wiadomo, że funkcja falowa dostarcza wyczerpującego opisu mikroświata (tu tkwiła niekompletność w ujęciu Einsteina), to jej obecna niekompletność ujawnia się w niezdolności współczesnej mechaniki kwantowej do wzajemnego pogodzenia niekompatybilności procedur kwantowych **U** oraz **R**.

Ku kwantowej teorii grawitacji

Większość obecnych wysiłków interpretacyjnych mechaniki kwantowej skupia się na poprawianiu istniejących interpretacji przy utrzymaniu podstawowych założeń samej teorii. Jednym z najbardziej jaskrawych przypadków takiej strategii jest wspomniana już wcześniej interpretacja mechaniki kwantowej przy użyciu spójnych historii kwantowych. W tym aspekcie interpreta-

cja ta tkwi w *nurcie kopenhaskim*, zdążającym do maksymalnego udoskonalenia matematycznego formalizmu obliczania prawdopodobieństw otrzymania konkretnych obserwacji w eksperymencie. Zgodnie z postulatem kopenhaskim, mechanika kwantowa (a dokładnie funkcja falowa) dysponuje całkowitą wiedzą o systemie stąd też jakiegokolwiek zmiany w tej teorii nie wchodzi w rachubę. Innymi słowy, mechanika kwantowa jest teorią całkowicie poprawną i nie należy podejmować żadnych prób modyfikacji jej fizycznych podstaw w celu usunięcia trudności interpretacyjnych. Jak zatem rozwikłać radykalną niekompatybilność dyskutowanych powyżej procedur kwantowych unitarnej ewolucji wektora falowego $\mathbf{U}$ i jego nieodwracalnej redukcji $\mathbf{R}$ w procesie oddziaływania z makroskopowymi urządzeniami pomiarowymi?

Przyglądając się całej gamie propozycji interpretacyjnych warto zauważyć, iż niezależnie od szczegółowych rozwiązań, istnieje pewna zgodność co do tego, iż problemów mechaniki kwantowej nie można rozwiązać na bazie pojedynczych, izolowanych systemów kwantowych takich jak cząstki elementarne i atomy. Idea ta niewątpliwie bierze swój początek od sugestii Johanna von Neumanna, który twierdził, iż opis kwantowy powinien stosować się nie tylko do mikroświata pojedynczych atomów, ale także do układów makroskopowych skoro ostatecznie w ich skład wchodzi właśnie atomy. Doświadczenie zmysłowe przekonuje jednak, iż świat makroskopowy, postrzegany przez człowieka nie podlega regułom linowej ewolucji wektora falowego $\mathbf{U}$ ponieważ nie da się zaobserwować kota Schrödingera jednocześnie żywego oraz martwego¹⁶. Z uwagi na fakt, iż mechanika kwantowa nie nadaje się do opisu ciał makroskopowych (ściśle biorąc klasycznych co dokładnie odpowiada *niekompletności* mechaniki kwantowej w rozumieniu Einsteina), istnieje fundamentalna potrzeba sformułowania ogólniejszej teorii, opisującej przechodzenie (emergencję!) świata kwantowego w świat klasyczny. Teoria ta połączy w sobie dwie przeciwstaw-

¹⁶ Wojciech P. Grygiel, Is the Schrodinger's Cat Dead or Alive?, *Zagadnienia Filozoficzne w Nauce*, XXXVII, 2005.

ne sobie procedury kwantowe $\mathbf{U}$ oraz $\mathbf{R}$ ¹⁷. Zagadnienie wzajemnej relacji między dwoma rzeczywistościami o zdecydowanie odmiennych własnościach, jest również niezwykle doniosłe z filozoficznego punktu widzenia.

Roger Penrose zdaje się jednak czynić dużo dalszy krok sugerując, iż rozwiązywanie problemów interpretacyjnych mechaniki kwantowej będzie możliwe jedynie w ramach *kwantowej teorii grawitacji*, to jest teorii, która połączy w sobie mechanikę kwantową oraz ogólną teorię względności. Prace nad stworzeniem takiej teorii prowadzone są obecnie przez wielu fizyków i opierają się one głównie na wyjaśnieniu struktury *osobliwości czasoprzestrzeni*¹⁸. Oczywiście wnioskiem z takiego postawienia sprawy jest stwierdzenie, iż „ratunku” dla mechaniki kwantowej należy szukać w kontekście globalnym, to jest takim, który połączy w sobie własności mikroświata kwantowego z makroskopową strukturą Wszechświata jako całości, wynikającą z ogólnej teorii względności.

W tym momencie przychodzi jednak czas na zaprezentowanie najbardziej kontrowersyjnego wątku w koncepcji mechaniki kwantowej, jaką prezentuje Roger Penrose. Sądzi on bowiem, „że wewnętrzne problemy mechaniki kwantowej mają zupełnie fundamentalny charakter” i nie można ich usunąć proponując jedynie poprawioną lub nawet całkowicie nową interpretację. Oznacza to tyle, „że pomimo cudownej dokładności mechaniki kwantowej w jej strukturze trzeba wprowadzić pewne zmiany, a ogólna teoria względności daje nam wskazówki, jakie powinny być te zmiany”¹⁹. Innymi słowy, w procesie przysłowiowego „ożenku” mechaniki kwantowej z ogólną teorią względności, musi nastąpić modyfikacja istotnych założeń mechaniki kwantowej tak, aby nowa, ogólniejsza teoria uwzględniała procedurę $\mathbf{U}/\mathbf{R}$, która połączy w sobie obydwie dyskutowane procedury i w ten sposób wyeliminuje

¹⁷ R. Penrose, *Nowy umysł cesarza*, Warszawa: PWN 2000, 333.

¹⁸ M.Heller, L. Pysiak, W. Sasin, *Gen. Rel. Grav.* 36 (2004) 111–126; L.Pysiak, M. Heller, Z. Odrzygózd, W. Sasin, *Gen. Rel. Grav.* 37 (2005) 541–555.

¹⁹ R. Penrose, *Nowy umysł cesarza*, Warszawa: PWN 2000, 388.

ich niekompatybilność. Z uwagi na fakt, iż znaczna większość fizyków oczekuje kompromisu ze strony teorii względności Einsteina na rzecz mechaniki kwantowej, kontrowersyjność oraz niepopularność poglądów Rogera Penrose'a zasada się w dokładnie odwrotnym postawieniu tego zagadnienia.

Dlaczego redukcja?

Teoria *dekoherencji* opisuje zjawisko redukcji wektora falowego $\mathbf{R}$ w kontekście wygaszania interferencji kwantowych podczas oddziaływania układu kwantowego z makroskopowym otoczeniem. Nie wyjaśnia ona jednak *dlaczego* redukcja wektora falowego zachodzi i jakie są jej fundamentalne fizyczne przyczyny. Innymi słowy chodzi o poznanie mechanizmu, dzięki któremu ma miejsce sprzężenie wektora falowego danego układu z wektorem falowym otoczenia, prowadzące do zaniku stanów splątanych. W opinii Rogera Penrose'a większość „heroicznych” wysiłków w tym kierunku uwikłanych jest w podstawowe problemy takie jak: potrzeba wprowadzenia parametrów sztucznych z punktu widzenia fizyki, naruszenie prawa zachowania energii czy też trudności z przejściem do reżimu relatywistycznego²⁰. Penrose wyraźnie zastrzega jednak, iż jego koncepcja posiada zdecydowanie hipotetyczny charakter i, tak jak wnioski przedstawione powyżej, nie cieszy się specjalnym pochlaskiem w gronie fizyków. Wstępna jej analiza świadczy jednak o tym, iż jest to koncepcja intrygująca przede wszystkim ze względu na fakt, iż stara się usytuować zagadnienie redukcji wektora falowego w kontekście kosmologicznym na bazie wspomnianej już przed chwilą teorii kwantowej grawitacji.

Liniowość równania Schrödingera, która implikuje liniowość kwantowej procedury $\mathbf{U}$, niewątpliwie stanowi czynnik decydujący o elegancji mechaniki kwantowej jako teorii. Liniowość ta w oczywisty sposób przenosi się na kwantowo-mechaniczne równanie Schrödingera co uwidacznia się w liniowości kwantowej procedury

²⁰ R. Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, New York: Alfred A. Knopf 2005, 812.

U i co w niekwestionowany sposób również decyduje o elegancji mechaniki kwantowej. Liniowość ta jednak, jak stwierdza Penrose, jest bezpośrednim przyczynkiem dla problemu pomiaru, ponieważ redukcja wektora falowego załamuje liniową ewolucję w czasie zgodnie z procedurą U ²¹. Nie należy więc wykluczać, iż nowa teoria, łącząca w sobie procedury U oraz R będzie teorią nieliniową. Kolejny etap spekulacji Penrose'a jednoznacznie wskazuje, iż dalsze wskazówki w zakresie poszukiwań mechanizmu redukcji wektora falowego R tkwią w ogólnej teorii względności (obraz makro wkracza zatem w świat mikroskopowy) a szczególnie w zagadnieniu *osobliwości czasoprzestrzeni*. Powinno ono znaleźć swoje rozwiązanie w kwantowej teorii grawitacji. Nie wnikając w tej chwili w szczególności formalne wystarczy tylko wspomnieć, iż zgodnie z hipotezą zerowej *krzywizny Weyla*, tensor krzywizny czasoprzestrzeni Weyla zdąża do zera w bezpośrednim sąsiedztwie (a dokładnie przyszłości!) osobliwości początkowej. Z kolei w bezpośrednim sąsiedztwie (przeszłości) osobliwości końcowej, tensor Weyla dąży do nieskończoności. Na bazie tych danych, Roger Penrose wysuwa tezę, iż poszukiwana teoria kwantowej grawitacji, która ma w pełni wyjaśnić powyższe hipotezy, musi być teorią *asymetryczną* w czasie. I znów uwaga – teza ta nie jest powszechnie akceptowana przez świat fizyki z powodów, które Penrose szczegółowo dyskutuje w swojej monografii²². Między innymi, stała się ona powodem znanego sporu Penrose'a ze Stephenem Hawkingiem.

Na tym tle pojawia się jednak kolejne pytanie: jak pogodzić fakt, iż kombinacja dwóch symetrycznych w czasie teorii: mechaniki kwantowej (dotyczy głównie procedury U) oraz ogólnej teorii względności daje w efekcie teorię w czasie antysymetryczną? Czy czasowa symetria procedury U powinna implikować czasową symetrię procedury R ? Roger Penrose jest jednak zdania, iż jeżeli procedura R stanowi rzeczywiście podstawę do obliczania prawdo-

²¹ R. Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, New York: Alfred A. Knopf 2005, 816.

²² R. Penrose, *Nowy umysł cesarza*, s. 392.

podobieństw, to procedura ta musi być *antysymetryczna* względem czasu. Samokrytycyzm Penrose’a sięga chyba zenitu, kiedy stwierdza on, iż jemu też przydarzyło się popełnić błąd w którym założył, że w dowolnym układzie kwantowym, poddanym dwóm obserwacjom w pewnym odstępie czasu, prawdopodobieństwo otrzymania drugiego wyniku przy znajomości pierwszego jest równe prawdopodobieństwu sytuacji przeciwnej – gdy znany jest drugi wynik a pytanie dotyczy otrzymania pierwszego²³.

Aby się przekonać, iż jest to sytuacja błędna i że obydwa prawdopodobieństwa nie są sobie w rzeczywistości równe, Penrose proponuje prześledzenie prostego eksperymentu w którym w tor wiązki światła wysyłanego przez lampę wstawiono zwierciadło półprzepuszczalne a za zwierciadłem umieszczono detektor. Bez wdawania się w specjalne szczegóły doświadczalne nietrudno zauważyć, że o ile prawdopodobieństwo dotarcia fotonu do detektora wynosi $1/2$ o tyle w przeciwnym biegu zdarzeń widać, że jeżeli foton został zarejestrowany przez detektor to musiał zostać wyemitowany przez lampę a nie przez „cegłę w ścianie”! Prawdopodobieństwo takiego procesu jest zatem równe jedności wskazując jednoznacznie na czasową asymetrię kwantowej procedury redukcji wektora falowego **R**. W konsekwencji nie może ona w żaden sposób wynikać z czasowo-symetrycznej procedury **U**. Przy tak wyidealizowanym eksperymencie, Penrose nie widzi niebezpieczeństwa aby o braku symetrii dyskutowanych prawdopodobieństw decydowała nieodwracalność, wynikająca z drugiej zasady termodynamiki.

Prezentacja ostatniego etapu hipotetycznej ścieżki, jaką Penrose buduje w celu fizycznego uzasadnienia procedury redukcji wektora falowego **R**, wymagałaby bardziej wnikliwego wejścia w strukturę czasoprzestrzeni. Traktując to zagadnienie jedynie hasłowo, chodzi tutaj o mechanizm kompensacji utraty informacji w osobli-

²³ R. Penrose, *Nowy umysł cesarza*, Warszawa: PWN 2000, 395. Jako przykład publikacji, obciążonej dyskutowanym błędem zrównania prawdopodobieństw Penrose cytuje następujące źródło: R. Penrose, Singularities and time-asymmetry, w: *General Relativity: An Einstein Centenary* (red. S. Hawking i W. Israel), Cambridge: Cambridge University Press 1979, str. 584.

wościach czarnych dziur przy pomocy bifurkacji linii przepływu w polu grawitacyjnym, która to bifurkacja wywoływana ma być właśnie na skutek procesu redukcji wektora falowego. Innymi słowy, jak pisze Penrose, „sama możliwość pojawienia się czarnych dziur (i związanej z tym utraty informacji) musi zostać skompensowana przez indeterminizm teorii kwantowej”. Oznacza to, że: „hipoteza zerowej krzywizny Weyla i redukcja wektora stanu w mechanice kwantowej są ze sobą głęboko związane, a zatem operacja R istotnie jest skutkiem działania kwantowej grawitacji”²⁴. Szczegółowe uzasadnienie tego wniosku można znaleźć we wspomianej już kilkakrotnie monografii Penrose'a *The Road to Reality*²⁵.

Na koniec warto także wspomnieć, iż czysto spekulatywny charakter przedstawionego tutaj mechanizmu wektora falowego poddyktowany jest głównie tym, iż fizycy nie posiadają jeszcze odpowiedniego narzędzia matematycznego do poprawnego „osadzenia” kwantowej teorii grawitacji. Penrose uważa, iż konieczna jest jakaś nowa przestrzeń matematyczna, która z pewnością nie będzie ani przestrzenią Hilberta ani też klasyczną przestrzenią fazową. Wydaje się zatem, iż wiele nadziei można pokładać w geometriach nieprzemiennych, które łączą w sobie kwantowo–mechaniczną nieprzemienność z geometrią czasoprzestrzeni w ogólnej teorii względności²⁶.

Uwagi końcowe – okiem filozofa

Nie ulega wątpliwości, iż koncepcja mechaniki kwantowej Rogera Penrose'a jest zaangażowana ontologicznie. Postawienie bowiem tezy, iż wektor falowy stanu opisuje dokładnie to, co obiektywnie istnieje na poziomie mikroświata, stanowi opowiedzenie się za bardzo konkretnym obrazem rzeczywistości. Co ciekawe, obraz ten uzyskał już znaczące poparcie eksperymentalne w postaci omawia-

²⁴ R. Penrose, *Nowy umysł cesarza*, Warszawa: PWN 2000, 406–407.

²⁵ R. Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, New York: Alfred A. Knopf 2005, 842 et sqq.

²⁶ Cf. Ref. 18.

nych wcześniej doświadczeń Alana Aspecta. Oznacza to, iż nie chodzi tu tylko o ontologię teorii fizycznej w sensie Quine'a ale także o to, że ontologia ta z dobrym przybliżeniem odpowiada fizycznej rzeczywistości.

Główna cecha charakterystyczna obrazu świata kwantowego Penrose'a, jaką jest *nielokalność*, sprawia, iż radykalnie odbiega on swoimi własnościami od świata klasycznego, wykraczając w ten sposób poza zdolności wyobrażeniowe człowieka. Człowiek nie potrafi bowiem zdroworozsądkowo skonstruować nawet jego przybliżonej reprezentacji. I nie musi, ponieważ w obszarze funkcjonowania ludzkich zmysłów interferencje kwantowe, będące przejawem nielokalności, nie występują. Nie oznacza to jednak, iż w takim momencie należy „złożyć broń” i nie poszukiwać dalej. Współczesna nauka dostarcza metod, umożliwiających penetrację w głąb materii. Jak pisze ks. Michał Heller: „matematyczny opis przyrody sięga pod widzialną powierzchnię przyrody, chwytą związki pomiędzy mierzalnymi cechami przedmiotu, takie związki, które same przez się są niedostępne dla poznania zmysłowego”²⁷.

Abstrahując zupełnie od szczegółowego mechanizmu, filozoficzna doniosłość samego faktu obiektywizacji redukcji wektora falowego tkwi także w wykazaniu bezpodstawności wszelkich prób uzależnienia tej redukcji od ingerencji świadomego obserwatora. Próby takie pojawiły się we wczesnym stadium interpretacyjnym mechaniki kwantowej w latach dwudziestych ubiegłego stulecia, zwłaszcza na kanwie osławionego paradoksu kota Schrödingera. W efekcie położenia zbyt wielkiego nacisku na związek formalizmu kwantowego z wiedzą obserwatora na temat badanego układu a przez to z jego aktami poznawczymi uznano, iż to obserwator dokonuje ostatecznego rozstrzygnięcia o losie kota, znajdującego się przed pomiarem w hipotetycznym stanie zawieszenia między życiem i śmiercią. Formalne potraktowanie takiego zagadnienia wymagałoby rozważenia sprzężeń, jakie zachodzą między stanami obiektu kwantowego a stanami umysłu obserwatora a to z kolei precyzyjnego zdefinio-

²⁷ M. Heller, *Filozofia i wszechświat*, Kraków: Universitas 2006, s. 136.

wania specyfiki stanów kwantowych mózgu, co na dzień dzisiejszy leży całkowicie poza możliwościami fizyki²⁸. Paradoks doczekał się zresztą swojego czysto fizycznego rozwiązania na bazie teorii dekoherencji²⁹. Obiektywizacja redukcji wektora falowego i ewentualne powiązanie jej z oddziaływaniami grawitacyjnymi umożliwia aplikację mechaniki kwantowej w każdym zakątku Wszechświata dla układów kwantowych oddziałujących z obiektami, posiadającymi masę. Innymi słowy, może ona śmiało tłumaczyć procesy kwantowe w zupełnej niezależności od tego, czy znajdują się one pod okiem ludzkiego obserwatora czy też nie.

Najbardziej intrygującą filozoficznie konkluzją koncepcji Penrose'a wydaje się jednak być stwierdzenie, iż świat kwantowy jest *realny ale niemierzalny*. Siła „klasycznego” przyzwyczajenia, iż to co wskazuje urządzenie pomiarowe odzwierciedla realny stan rzeczy w badanym układzie, musi tutaj ustąpić przyjęciu prawdy, iż niemożność bezpośredniego poznawczego uchwycenia nie koniecznie rozsądza o istnieniu czy też nie-istnieniu rzeczywistości o odmiennych własnościach. Równie trudno może być pogodzić się z faktem, iż na poziomie kwantowym obowiązuje logika, odmienna od klasycznej, w ramach której zdroworozsądkowa zasada *niesprzeczności* traci swój sens a wszelkie próby konstruowania interpretacji *naturalnych*, dopasowanych do specyfiki poznania zmysłowego, nie znajdują swojego uzasadnienia. Co więcej, rzeczywistość kwantowa wydaje się być poziomem bardziej fundamentalnym z którego wyłania się świat makroskopowy. Innymi słowy, struktura mikroskopowa poziomu kwantowego rzutuje na ostateczny kształt tego, co człowiek postrzega. Czystym nieporozumieniem byłaby więc strategia odwrotna tłumaczenia zjawisk kwantowych własnościami makroskopowymi tylko dlatego, że są zdroworozsądkowo zrozumiałe. Aby w taką pułapkę nie popaść potrzeba przede wszystkim intelektualnej pokory, o której ks. Michał Heller mówi prosto ale dobitnie: „rzeczywistość nie musi być przykrojona do moich inte-

²⁸ R. Penrose, *The Road to Reality*, ss. 807–808.

²⁹ Cf. Ref. 16.

lektualnych możliwości (np. do tego, co przedstawia mi się jako oczywiste); to ja muszę zaakceptować rzeczywistość, jaką ona jest i jaką odkrywa mi się w doświadczeniu”³⁰.

³⁰ M. Heller, *Filozofia i wszechświat*, s. 21.