

## **Nauka i technologie – zadanie zaliczeniowe**

PWr. WIZ, Informatyka, Data: 05.07.2020

Student	Email: <a href="mailto:242493@student.pwr.edu.pl">242493@student.pwr.edu.pl</a>	Ocena
Indeks	<u>242493</u>	
Imię	<u>Arkadiusz</u>	
Nazwisko	<u>Rasz</u>	

# Problem pomiaru w mechanice kwantowej

## Wstęp

Fizyka klasyczna odniosła wielkie sukcesy w reprezentacji wizji świata. Potrafi wyjaśnić niemal każde zjawisko, w tym astronomię, optykę, termodynamikę oraz fizykę cząstkową. Stała się standardem w rozumieniu świata, pozwalając na postęp w wynalazkach i nauce. Opisuje świat za pomocą fizycznych obiektów, które posiadają swoje cechy fizyczne (masa, prędkość, kształt...). Obiekty oddziałują ze sobą, a działania te są deterministyczne. Znając wartości wszystkich cech obiektów można zawsze wyliczyć następny stan skutkowany oddziaływaniem. Czynniki losowe tutaj nie istnieją. Zadaniem fizyki klasycznej jest badanie i mierzenie cech oraz ustalenie praw fizycznych, które poprawnie opisują rzeczywistość w świecie. Pomiary cech uważane są jako zewnętrzne i ogólnie nie wpływają na badany układ w żaden sposób. Równocześnie rola samego obserwatora wykonującego pomiar nie ma również znaczenia na badany układ fizyczny i nie odgrywa istotnej roli. Można więc mówić o wszechświecie jako układzie fizycznym, w którym wartości cech poszczególnych obiektów fizycznych są ustalone i mogą być zbadane, aby następnie obliczyć następujące stany. Można stwierdzić, że wszechświat ma pewien określony stan, znając który pewien zewnętrzny obserwator byłby w stanie zrekonstruować cały układ i przewidzieć następstwa. Podejście to nie pozwala jednak na głębokie zrozumienie istoty przyrody i jest jedynie ciężarem, który blokuje dalsze postępy. Taką wizję nazywa się realizmem obiektywnym – istnieje określony obiektywny stan wszechświata niezależny od obserwatora.

Fizyka klasyczna nie potrafi jednak opisać oddziaływań i zdarzeń zachodzących w mikroświecie. Eksperymenty wykonywane na obiektach o najmniejszych rozmiarach, jak elektronach, cząsteczkach elementarnych pokazały, że dotychczasowe rozumienie świata i równania go opisujące nie są wystarczające i tracą swoją prawdziwość na poziomie molekularnym. Z tych powodów musiało nastąpić odejście od klasycznego rozumienia i odnajdywania odpowiedzi nowymi sposobami i teoriami. Dział zajmujący się światem mikroskopowym jest mechanika kwantowa.

Mechanika kwantowa jest jednym z najbardziej skomplikowanych tematów w fizyce. Jest trudna do pojęcia pod względem matematycznym oraz koncepcyjnym, ale również nie ma uniwersalnego wśród fizyków definicji wykorzystywanych pojęć w niej występujących. Definicji pomiaru czy pola falowego jest interpretowana różnie.

Trudność ta pozwala jednak na przedstawienie tej dziedziny fizyki nie jako przepisów do wykonywania rachunków i obliczeń pozwalających na zrozumienie układu fizycznego w jakimś konkretnym celu, lecz przedstawić ją jako fascynujący obszar, którego umysł ludzki nie jest w stanie pojąć. Sam temat często dotyka wątki filozoficzne w próbach znalezienia tajemnicy działania wszechświata.

## Problem pomiaru

Kwantowa teoria pola wyjątkowo dobrze opisuje oraz przewiduje zachowanie elektronów w przeprowadzanych eksperymentach. Okazuje się niezwykle skuteczna do opisywania wszelkich zachowań układów fizycznych w przestrzeni i czasie, jednocześnie zapewniając zgodność z teorią względności. Od czasu jej rozwoju na początku XX wieku stanowi ona podstawę do realizacji teorii fizyki.

Eksperymentem ilustrującym problem pomiaru jest znany paradoks kota Schrödingera. Kot jest umieszczany w pudełku wraz z mechanizmem do zabicia go, który jest uruchamiany na podstawie jakiegoś niemożliwego do przewidzenia w czasie zdarzenia (np. rozpad atomu). Dla zewnętrznego obserwatora, nie jest możliwe stwierdzenie czy kot żyje, czy też nie bez otwierania pudełka. Jest to analogiczne do wykonywania pomiaru w mechanice kwantowej. Kot jest w superpozycji dwóch stanów, którym towarzyszy dane prawdopodobieństwo. W momencie pomiaru, obserwowany jest dokładnie jeden stan. Problem pomiaru skupia się na wyjaśnieniu, jaka jest zależność pomiędzy dwoma interpretacjami oraz w jaki sposób prawdopodobieństwa stanów zamieniane są w jeden określony stan.

Cała teoria mechaniki kwantowej opiera się na funkcji fali, która reprezentuje stany wszelkich układów fizycznych w mechanice kwantowej. Podstawową zasadą jest to, że reprezentacje z użyciem funkcji fali są kompletne: wszystkie dostępne informacje dotyczące badanego układu fizycznego zawarte są w jego funkcji fali.

Jedną z nieodłączalnych wartości elektronu w mechanice kwantowej jest jego moment pędu, nazywany również spinem. Moment ten opisuje się dwoma prostopadłymi do siebie momentami, zwanymi spinem-x oraz spinem-y. Wszystkie do tej chwili obserwacje pokazały, że wartości spinów tych mogą przyjmować jedynie wartości -1 oraz +1. Pomiar wartości spinów jest w tym czasie rutynową obserwacją z użyciem dostępnych przyrządów. W danym czasie pomierzyć można jedynie wartość spinu w kierunku jednej osi. Jest to wykonywane poprzez skierowanie badanego elektronu przez „otwór” odpowiadający kierunkowi badanego spinu. Elektron następnie przechodzi przez jeden z dwóch dostępnych otworów, reprezentujących odpowiednio spin -1 oraz +1.

Empirycznym faktem jest również brak korelacji pomiędzy wartościami spinu-x oraz spinu-y. Elektrony posiadające -1 jako wartość spinu-x, po zmierzeniu spinu-y dla wystarczająco dużej ich liczby, powinny posiadać równy podział wartości -1 oraz +1. Ważne jest również, że pomiar wartości spinu elektronu w kierunku jednej osi może zaburzyć pomiar wartości w kierunku innej osi. Badania pokazują również, że wartości spinu połowy badanych elektronów ulega zmianie po przeprowadzeniu pomiaru. Jest to całkowicie sprzeczne z fundamentami istniejącymi w fizyce klasycznej, gdzie pomiary oraz obserwator nie wpływają na badany układ.

Fizycy oraz filozofowie uważają, że własność ta jest fundamentalna i niemożliwa do wyeliminowania. Nie jest również zależna od żadnej innej cechy elektronu. Reguła ta została opisana jako zasada nieoznaczności Heisenberga (uncertainty principle). Mówi, że istnieją takie pary wielkości, których nie da się jednocześnie zmierzyć, ponieważ pomiar jednej z nich zaburzy wartość drugiej. W przykładzie opisywanym wyżej, jest to spin-x oraz spin-y.

W prostym przypadku układu fizycznego składającego się z pojedynczej cząsteczki, jej funkcja falowa przyjmuje postać funkcji położenia odpowiadającej tej w fizyce klasycznej. Rozpatrzmy dwa regiony A oraz B. Wartość funkcji fali cząsteczki znajdującej się w regionie A przyjmuje zerową wartość poza regionem oraz niezerową w obszarze regionu. To samo dotyczy regionu B. wartość funkcji fali jest w tym przypadku zależna od jej pozycji i tylko tam posiada wartość oraz jest w stanie wykonywać oddziaływania. W przypadku superpozycji cząstki znajdującej się równocześnie w obszarze A oraz B jej wartość funkcji fali posiada wartości w obu regionach.

Sformułowane w mechanice kwantowej prawa fizyki koncentrują się na tym, w jaki sposób funkcja fali zmienia się w czasie. Fizycy wyróżniają tutaj podział praw na dwie kategorie. Jedną z nich jest stosowana w przypadku, kiedy system fizyczny jest bezpośrednio obserwowany, a druga, kiedy obserwator nie istnieje. Prawa w pierwszej kategorii opierają się głównie na równaniach różniczkowych ruchu. Podejście takie pozwala w pewnym stopniu badać zmianę układu. Istnieją jednak dobre powody, aby wykluczyć te prawa jako prawdziwe prawa fizyki opisujące przyrodę w fizycznym wszechświecie. Zakładają, że oddziaływania są deterministyczne, a jednak badania zdecydowanie pokazują element losowy w pomiarach pozycji cząsteczek opisanych za pomocą superpozycji. Pomiar takiej cząsteczki powoduje również przejście samego mechanizmu pomiarowego do superpozycji jednocześnie będąc w stanie wykonanego pomiaru wartości spinu równej  $-1$  oraz  $+1$ . W standardowej interpretacji mechaniki kwantowej, w takim przypadku, kiedy układ fizyczny jest obserwowany oraz wykonywane są pomiary, druga opisana kategoria praw fizycznych powinna być wyłącznie używana. W ten sposób, pozycja cząsteczek nie jest opisywana dokładną wartością, lecz za pomocą prawdopodobieństwa znajdowania się w każdym możliwym stanie. Cząsteczka w stanie superpozycji znajdowania się w regionie A oraz B jednocześnie nie znajduje się więc w jednym z nich, lecz posiada szansę 50% znajdowania się w każdym z nich oraz 0% poza tymi obszarami, a dokładna pozycja nie ma sensu istnienia.

Podział pomiędzy użyciem obu opisywanych kategorii praw fizycznych jest zaskakująco niejasny. Zwykle stosuje się interpretację, że jeden z nich jest stosowany w przypadku wykonywania pomiarów, a drugi w przypadku „zwykłych procesów fizycznych”. Wiele fizyków oraz filozofów nie jest usatysfakcjonowanych takim podziałem, szczególnie biorąc pod uwagę równoczesny brak standardowego określenia wyrażenia „pomiar”. Prawa fizyki powinny być bowiem uniwersalne i stałe, a nie zależne od interpretacji.

Zakładając, że opisane wyżej kategorie praw fizycznych są nietrafne z powodu braku poprawnego podziału pomiędzy nimi, pozostaje problem braku zjawiska superpozycji w samych pomiarach wykonywanych w badaniach. Od lat siedemdziesiątych problem ten nazwany jest problemem pomiaru oraz stał się jednym z największych wyzwań w mechanice kwantowej.

## Próby rozwiązania problem pomiaru

Od powstania problemu pomiaru powstały dwa wpływowe jego rozwiązania. Pierwszy z nich został zaproponowany przez brytyjskiego fizyka Davida Bohma. Zakłada on, że zmiany w układach fizycznych reprezentowanych przez funkcję fali są rzeczywiście opisywane równaniami różniczkowymi ruchu, lecz zaprzecza stwierdzeniu, że informacje zawarte w takiej reprezentacji układu są kompletne. Według niego, istnieje dodatkowa wielkość fizyczna która rzeczywiście odpowiada za wynik wykonywanego pomiaru.

Drugie z rozwiązań zaproponowane przez grupę fizyków twierdzi, że informacje zawarte w funkcji fali są kompletne, lecz jej ewolucja nie jest kontrolowana przez równania różniczkowe, jak myślano wcześniej.

### Teoria Bohma

Rozwiązanie Bohma zakłada, że cząstka fizyczna w każdym czasie znajduje się w dokładnie jednym miejscu. Funkcje fali nie są obiektami matematycznymi do obliczania układu ruchu, lecz obiektami fizycznymi. Podobnie jak pola elektryczne czy magnetyczne, istnieją w całej przestrzeni i powodują kierowanie cząstek po przestrzeni kwantowej. Oddziaływania zachodzące na polu można opisać standardowymi równaniami różniczkowymi. Prawa opisywane przez Bohma dla cząsteczek są również w pełni deterministyczne.

Bazując na powyższych założeniach, znając pozycje wszystkich cząsteczek oraz wartości funkcji fali w całej przestrzeni, można z pewnością obliczyć wszystkie poprzednie oraz następne pozycje każdej cząsteczki. Każdy wynik posiada jednak pewną niepewność, która jest nieunikniona i wynika z pewnego elementu, o którym jeszcze nie posiadamy wiedzy. Nie istnieje czynnik losowy. Wszystko to jest podstawą teorii Bohma (teoria fali pilotującej).

Dla przykładu, mierząc spin elektronu, tak, jak zostało opisane wyżej, sama cząsteczka będzie w dowolnym czasie w dokładnie jednym miejscu oraz przemieści się przez dokładnie jeden otwór odpowiadający jej spinowi. Jednak funkcja fali rozdzieli się po równo i przejdzie przez oba otwory, łącząc się wraz z cząsteczką na zewnątrz. Wszystkie ruchy cząsteczki oraz jej fali mogą zostać deterministycznie opisane równaniami różniczkowymi ruchu.

Jednym ze skutków praw opisywanych w teorii Bohma jest fakt, że jedynie część funkcji fali, na której znajduje się cząsteczka, może oddziaływać na inne cząsteczki. Konsekwencją tego jest brak możliwości zbadania wartości funkcji fali w regionie, w którym nie znajduje się cząsteczka. Przyrząd służący do wykonania pomiaru składa się z cząstek – a więc nie zaistnieje interakcja z funkcją fali. Nie jest możliwe jej zbadanie.

Teoria Bohma uwzględnia wszystkie niezrozumiałe dotychczas zachowania cząsteczek, na których dokonuje się pomiarów. Teoria całkowicie bazuje się na liniowych równaniach różniczkowych, które obszernie stosowane są w fizyce klasycznej, oraz nie odwołuje się do niepotwierdzonych oraz niespójnych kategorii praw fizyki w mechanice kwantowej.

## Teoria Ghirardiego, Rimini oraz Webera

Drugie zaproponowane rozwiązanie opiera się na założeniu, że funkcje fali są kompletnymi reprezentacjami stanu układów fizycznych, oraz nie są opisywane za pomocą równań różniczkowych ruchu. Równanie ruchu ma być zmodyfikowane, aby zawrzeć w sobie niezrozumiałe dotychczas zachowania w mechanice kwantowej oraz aby uniknąć problemu z superpozycją. Powstało wiele teorii opierających się na powyższych założeniach, najpopularniejszą z nich jest teoria opracowana przez Ghirardiego, Rimini oraz Webera w latach osiemdziesiątych. Jest ona do dnia dzisiejszego rozwijana.

Według tej teorii, zmiana układu fizycznego następuje zgodnie ze znanymi już równaniami ruchu opartymi na równaniach różniczkowych, lecz występuje bardzo małe prawdopodobieństwo w danej chwili w przestrzeni, że funkcja fali ulegnie załamaniu. Prawdopodobieństwa załamania są zależne od czasu oraz wartości funkcji fali oraz jest dystrybuowane na podstawie rozkładu prawdopodobieństwa Poissona. Pomiedzy załamaniami, funkcja fali zmienia się zgodnie z równaniami Schrödingera. W obszarach składających się z wielkiej liczby cząsteczek, załamania występują znacznie częściej niż w przypadku regionów o małej gęstości. Załamanie polega na multiplikacji funkcji fali tak, że po modyfikacji jest ona zerowa w każdym miejscu poza jednym regionem. Powoduje to sprowadzenie funkcji fali do jednego miejsca. Teoria nie stara się wytłumaczyć samego zjawiska załamania oraz na jakiej zasadzie i dlaczego występuje. Część fizyków oraz filozofów uważa, że można załamanie potraktować jako nowe podstawowe prawo fizyki, które istnieje, i nie można wytłumaczyć jego natury.

W przypadku obszarów o małej gęstości cząsteczek, zjawisko będzie niemal niezauważalne i praktycznie niemożliwe do zaobserwowania. W takim przypadku, pozostałe właściwości kwantowe pozostałyby nienaruszone bez większych odchyśleń. Pozwoliłoby to na dalsze badania właściwości kwantowych i innych czynników wpływających na funkcję fali. Badania w tej dziedzinie szybko rozwijają się w ostatnich latach.

## Teoria wielu światów

Powstały również inne teorie bazujące na innych założeniach niż te opisane powyżej. Są one wymagane do pogodzenia obserwacji w mechanice kwantowej z teoriami i prawami w innych dziedzinach fizyki. Jedną z takich teorii jest propozycja fizyka Hugh Everetta, która łączy w sobie problem pomiaru oraz hipotezę wielu światów. Według teorii, pomiar cząsteczki będącej w superpozycji powoduje rozgałęzienie rzeczywistości i wszechświata na dwa równoległe, w których odpowiednio zaszły obie możliwe obserwacje. Poza tą obserwacją, światy te są identyczne oraz ponownie ulegają rozgałęzieniu w przypadku kolejnych pomiarów. Teoria ta jest popularna w ostatnich latach, lecz nie wykazała zgodności z naturą stanów fizycznych opartej na prawdopodobieństwie.

Przyjęcie funkcji fali oraz zjawiska jej załamania podczas pomiaru jako cech występujących w fizyce, wymaga porzucenia realizmu obiektywnego. Obserwator ma w tym przypadku wpływ na układ, nie może się znaleźć na zewnątrz. Porzucenie realizmu obiektywnego spotkało się z entuzjazmem wielu filozofów, głównie opierających się na filozofii wschodu, która odrzuca

myślenie o niezależnych obiektach istniejących samotnie, bez zachodzenia w interakcje z innymi. Pogląd został również dobrze odebrany przez jednego z twórców mechaniki kwantowej, Erwina Schroedingera.

## Źródła

- [https://en.wikipedia.org/wiki/Objective-collapse\\_theory](https://en.wikipedia.org/wiki/Objective-collapse_theory)
- <http://home.agh.edu.pl/~kakol/efizyka/w36/main36a.html>
- [https://pl.wikipedia.org/wiki/Zasada\\_nieoznaczono%C5%9Bci](https://pl.wikipedia.org/wiki/Zasada_nieoznaczono%C5%9Bci)
- <https://www.britannica.com/topic/philosophy-of-physics/The-measurement-problem>
- <https://www.fuw.edu.pl/~demko/Teksty/filozofiaquantowa.pdf>
- [https://pl.wikipedia.org/wiki/Uk%C5%82ad\\_fizyczny](https://pl.wikipedia.org/wiki/Uk%C5%82ad_fizyczny)
- [https://www.pitt.edu/~jdnorton/teaching/HPS\\_0410/chapters/quantum\\_theory\\_measurement/index.html](https://www.pitt.edu/~jdnorton/teaching/HPS_0410/chapters/quantum_theory_measurement/index.html)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Many-worlds\\_interpretation](https://en.wikipedia.org/wiki/Many-worlds_interpretation)