

ZARZĄD WARSZAWSKIEGO ODDZIAŁU POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO

urządza 6 odczytów naukowo-popularnych na najaktualniejsze tematy

FIZYKI WSPÓŁCZESNEJ

Odczyty odbywać się będą co sobota w porządku następującym:

Dn. 29 lutego: Dr. JAN WEYSSENHOFF, Profesor Uniwersytetu Jagiellońskiego

Charakterystyczne różnice między nową a dawną fizyką

Dn. 7 marca: Mag. LEONARD SOSNOWSKI, Asystent Uniwersytetu J. Piłsudskiego

Kryzys zasady zachowania energii

Dn. 14 marca: Mag. fiz. i geofiz. CZESŁAW BIAŁOBRZESKI, Profesor Uniwersytetu J. Piłsudskiego

Teoria kwantowa metali

Dn. 21 marca: Dr. JAN BLATON, wykładający fizykę teoretyczną na Uniwersytecie Śl. Białego

Atomy i cząsteczki jako elementarne źródła światła

Dn. 28 marca: Dr. WOJCIECH RUBINOWICZ, Profesor Politechniki Lwowskiej

O indeterminizmie w nowoczesnej fizyce

Dn. 4 kwietnia: Dr. JERZY STARKIEWICZ, Asystent Uniwersytetu J. Piłsudskiego

I z o t o p y

Odczyty odbywać się będą w Zakładzie Fizyki Doświadczalnej
Uniwersytetu J. Piłsudskiego w Warszawie, ulica Hoża Nr. 69

Początek odczytów o godzinie 20-ej

Bilety w cenie 99 gr., dla członków P. T. F. i uczącej się młodzieży
w cenie 65 gr. do nabycia przy wejściu

Warszawa, w lutym 1936 roku

Druk. W. Pańskowski, Warszawa, Marsz. Pocha 7.



O indeterminizmie w nowoczesnej fizyce

Wykład naukowo-popularny wygłoszony dnia 28 marca 1936 w ramach cyklu 6 odczytów na najaktualniejsze tematy fizyki współczesnej staraniem zarządu warszawskiego oddziału Polskiego Towarzystwa Fizycznego w Zakładzie Fizyki Doświadczalnej U.W. przy ul. Hożej 69

Poznać, zrozumieć przyrodę jest pragnieniem chyba wrodzonym człowiekowi. Już jako dziecko stara się przecież wytłumaczyć sobie zjawiska przyrodnicze w otaczającym go świecie. Posługuje się przy tym interwencją karzełek i krasnoludków i tworzy sobie w ten naiwny sposób swą baśń o przyrodzie. Lecz i fizyk – czy nie posiada i on swoją precudną baśń o przyrodzie? Podając swoje poglądy teoretyczne fizyk przecież nawet nie usiłuje opowiadać, jak to właściwie rzeczywistość wygląda. Zdając sobie dokładnie sprawę z tego, że umysł człowieka nigdy nie zdoła dotrzeć do poznania rzeczywistości, uważa fizyk swoje teorie jedynie jako baśń, której ostatecznym, skromnym celem w fizyce dotychczasowej jest li tylko opisywanie przebiegu zjawisk przyrodniczych. Określenie „fizyka dotychczasowa” ma w ciągu obecnego wykładu oznaczać nam fizykę istniejącą jeszcze przed powołaniem teorii kwantów.

Nie mogłaby jednak fizyka dotychczasowa opisywać przebiegu zjawisk bez oparcia o pewne założenia, niby dogmaty. Jednym takim, obecnie chyba najbardziej aktualnym i najważniejszym jest, o czym się jeszcze przekonamy, zasada przyczynowości, czyli determinizm. Założenie to uważamy za tak oczywiste, że stanowi nie tylko podstawę całej dotychczasowej fizyki i w ogóle wszelkich nauk przyrodniczych, lecz nawet wszystkich nauk w ogóle, ba, aż podstawę naszego codziennego rozumowania. Bez wyjątku każdy z nas jest przecież przekonany, że każda przyczyna wywołuje nieodzownie pewien skutek. Np. nadmiar alkoholu wywołuje nieodzownie, powiedzmy delikatnie, pewien zawrót głowy. Zasadą przyczynowości przesiąkliśmy tak do krwi i kości, że zdaje się nam, iż jej zakwestionowanie nie rokuje nam lepszych widoków powodzenia aniżeli walka z wiatrakami. A jednak, najmłodsza latorośl fizyki współczesnej, teoria kwantów, która mimo swej młodości może się już pochłubić szeregiem niebываłych i przechodzących najśmielsze oczekiwania sukcesów, z której więc fizyk dziś zrezygnować nie może, postawiła nam niesłychanie śmiałe ultimatum: Chcesz korzystać z moich usług, musisz zdetronizować zasadę przyczynowości. Każdy nie-fizyk skłonny będzie z miejsca odrzucić takie zuchwałe żądanie. Jak to, powie on, w dobie obecnej, gdy poglądy fizyków zmieniają się bodaj szybciej niż mody na damskie kapelusze, miałbym ja dla woli tego młodzianiszka, tej teorii jakichś tam kwantów, którego dalszy rozwój wydaje mi się i tak zagrożony przez nowe pomysły fizyków, miałbym ja pozbyć się odwiecznych nawyków myślowych, miałbym się wyrzec determinizmu? Jak to, odtąd nie miałoby być prawdą, że odpowiednie kwantum szampana wywoła nieodzownie i zawsze pewne kwantum szampańskiego humoru? Na to możemy jednak odpowiedzieć: Nie bójcie się Państwo! Teoria kwantów nie rządzi kwantami szampana i kwantami szampańskiego humoru. Uwzięła się ona tylko na fizyków i to nawet tylko na zupełnie trzeźwych i rozsądnych.

By stało się całkiem zrozumiałe położenie determinizmu w fizyce nowoczesnej, należy się najpierw dokładnie zapoznać z treścią zasady przyczynowości w fizyce dotychczasowej. Do tego musimy się jednak odpowiednio przygotować. Panem życia i śmierci wszelkich pomysłów teoretycznych fizyka jest doświadczenie fizykalne. Wszelkie doświadczenia fizykalne musi fizyk przeprowadzać w układzie odosobnionym, tzn. musi

usunąć wszelkie wpływy uboczne, które mogłyby w jego aparaturach doświadczalnych zakłócać przebieg badanego zjawiska. By zbadać w laboratorium np. prawo spadania ciał pod wpływem siły ciężkości należy usunąć wpływ oporu powietrza. Niekiedy też i przyroda samorzutnie urzeczywistnia prawie że idealnie odosobnione układy fizyczne. Takim przykładem jest nasz układ planetarny, jeżeli chodzi o badanie ruchu ciał materialnych pod wpływem siły ciężkości.

Z biegiem czasu zachodzą w ogólności w każdym układzie fizycznym pewne zmiany. Jeżeli w pewnej chwili uda się nam zmierzyć położenia, prędkości, przyspieszenia itp. wielkości fizyczne dla ciał niebieskich naszego układu planetarnego, to z pewnością stwierdzimy, że w czasie późniejszym te wielkości się zmieniają. Określamy w fizyce fakt ten, mówiąc że stan naszego układu fizycznego zmienia się w czasie. Stan ten w każdym razie będzie jednoznacznie określony, jeżeli podamy wartości wszystkich wielkości, które w danym układzie w ogóle zmierzyć możemy.

Jakże teraz wypowie fizyk zasadę przyczynowości? Jako przedstawiciel nauk ścisłych musi przecież na poleceniu Hume'a wyrzucić na śmietnisko starych gratów naukowych zasadę przyczynowości w brzmieniu wpraw podanym. Oparte jest ono bowiem wyłącznie na pojęciach antropomorficznych jak przyczyna, skutek i nieodzowność, którym doświadczalnie niczego konkretnego w przyrodzie przyporządkować nie jesteśmy w stanie. Zastąpimy więc pojęcie przyczyny pojęciem stanu początkowego, tj. stanu naszego układu w ściśle określonym czasie, w którym zaczynamy obserwować nasze zjawisko fizyczne. Jako skutek natomiast będziemy uważać cały następujący po stanie początkowym przebieg zjawisk fizycznych w naszym układzie. A ostatecznie, pojęcie nieodzowności zastąpimy jednoznaczna określoną przebiegu zjawisk. Otrzymamy wówczas zgodnie z fizykiem-filozofem Machem następujące wysłownienie zasady przyczynowości: Stan początkowy odosobnionego układu fizycznego określa jednoznacznie przebieg zjawisk fizycznych w danym układzie. Tzn. ilekroć dany układ znajdzie się w pewnym stanie początkowym, zawsze obserwować będziemy identyczne stany naszego układu kolejno po nim następujące.

Zasada przyczynowości byłaby dla fizyka li tylko pustą gadaniną, gdyby nie mógł sprawdzić jej doświadczalnie. Jeżeli więc dotychczasowa fizyka uznaje zasadę przyczynowości, to musimy też od fizyki tej żądać, by prawa jej nie sprzeciwiały się doświadczalnemu sprawdzeniu tej zasady. Dążące do tego celu doświadczenia należałoby oczywiście przeprowadzić w układzie odosobnionym. Lecz jest rzeczą zrozumiałą, że układ odosobniony przestaje być takowym, jeżeli poddamy go badaniom doświadczalnym, ponieważ wówczas musimy nań działać siłami zewnętrznymi. Zdawałoby się więc, że zasada przyczynowości jest zasadniczo niesprawdzalna w dotychczasowej fizyce. Z tej trudności istnieje jedno jeszcze wyjście, jakkolwiek tylko przez wąską ścieżkę. Nie możemy wprawdzie zasady przyczynowości sprawdzić w fizyce dotychczasowej przez jedno doświadczenie wprost, ale za to możemy otrzymać jej potwierdzenie jako granicę wyników całego ciągu odpowiednio dobranych doświadczeń, po prostu ciągu doświadczeń, w których to zaburzenia wywołane przez badanie układu stają się coraz bardziej znikome. Fakt, że w fizyce dotychczasowej ciąg takich doświadczeń istnieje, jest dla nas bardzo ważny, ponieważ ciąg taki w fizyce kwantów nie istnieje i ona właśnie z tego powodu dochodzi do indeterminizmu. Chcemy więc zobaczyć, jak wygląda nasza wąska ścieżka w konkretnym przypadku.

Założmy, że postanowiliśmy oznaczyć ściśle położenie jakiegoś ciała, np. elektronu. By tego dokonać, musimy go tak powiedziawszy dotknąć. Nie musimy tego uczynić oczywiście palcem, ale przynajmniej delikatną wiązką światła, by elektron nasz oświetlić i zobaczyć lub sfotografować w naszym instrumencie pomiarowym, np. mikroskopie. Światło jednak działa, jak wiemy, pewną siłą na ciała, na które pada. Układ oświetlony przestaje więc być w ścisłym tego słowa znaczeniu układem odosobnionym. Należy zatem żądać, aby siła spowodowana przez oświetlenie mogła być dowolnie mała. Fizyka dotychczasowa zakłada, że da się to osiągnąć przez zmniejszenie natężenia światła. Dalej jednak wiemy, że żadnym instrumentem optycznym nie możemy rozpoznać mniejszych odległości aniżeli długość fali światła, oświetlającego nasz elektron. Żeby więc nie zakłócając naszego układu zmierzyć możliwie dokładnie położenie elektronu, musielibyśmy go, według praw fizyki dotychczasowej, oświetlić światłem o możliwie małej długości fali. Zasadniczo jednak całość wszystkich czynności, potrzebnych do doświadczalnego oznaczenia pewnej wielkości fizycznej, a więc cały ten ciąg doświadczeń, uważać należy w fizyce dotychczasowej jako jeden pomiar.

Musimy tu rozpatrzyć jeszcze jedną kwestię, łączącą się z doświadczalną sprawdzalnością zasady przyczynowości, a jednocześnie posiadającą znaczenie dla naszych późniejszych rozważań kwantowych. Chodzi nam mianowicie o usprawnienie doświadczalnego oznaczania stanów. Chcemy tu zwrócić na to uwagę, że nie musimy koniecznie podać wszystkich wielkości fizycznych, które dla danego układu dadzą się doświadczalnie wyznaczyć, by określić jednoznacznie jego stan. Istniejące prawa fizyczne łączą bowiem ze sobą pewne grupy wielkości fizycznych tak, że jeżeli znamy tylko pewną część tych wielkości, to pozostałą ich resztę możemy obliczyć z odnośnych praw. Nie sposób przecenić tej redukcji ilości wielkości fizycznych w jej skutkach. Więzy nałożone przez prawa fizyki poszczególnym stanom są mianowicie tak silne, że sprowadzają ilość tych tak zwanych niezależnych zmiennych układu, tj. wielkości fizycznych, przy pomocy których możemy obliczyć wszystkie pozostałe, do bardzo małej liczby. By np. określić stan naszego układu planetarnego dla potrzeb mechaniki, wystarczy podać dla każdego ciała niebieskiego jego położenie oraz jego prędkość jako zmienne niezależne. Przyspieszenia tych ciał natomiast są nam już określone przez ich położenia oraz masy.

Mówiliśmy dotąd wyłącznie tylko o determinizmie w fizyce dotychczasowej. Należy jednak stwierdzić, że posiadała ona też i swój indeterminizm, a to w tak zwanej fizyce statystycznej. By zrozumieć, czym jest ta fizyka statystyczna, proszę sobie przedstawić, że mamy w szczelnie zamkniętym zbiorniku pewną ilość jakiegoś gazu. Gaz ten wywiera wówczas na ściany naszego zbiornika pewne ciśnienie, spowodowane niezmiernie licznymi uderzeniami cząsteczek gazu, które wpadają na ściany i odbijają się od nich. Przedstawmy sobie, że w pewnej chwili znamy położenie i prędkość każdej poszczególniej cząsteczki gazu, tzn. stan początkowy naszego gazu. Według zasady przyczynowości dalsze losy każdej cząsteczki z osobna i wszystkich razem są przez to po wszelkie czasy przesądzone. Przy pomocy mechaniki moglibyśmy je zasadniczo przynajmniej obliczyć. Lecz zadanie to jest praktycznie zupełnie niewykonalne. Bo, by spisać choćby już tylko stan początkowy jednego litra gazu, przeznaczając dla każdej cząstki tylko 1 cm^2 , musielibyśmy użyć tyle papieru, że można by nim pokryć nasz glob przeszło 5000 razy. Widzimy więc, że istnieją zagadnienia fizyczne, które dadzą się wprawdzie zasadniczo, jednak nie praktycznie rozwiązać. Ale, przy tego rodzaju problemach, gdzie wchodzi w grę tak ogromne ilości cząsteczek, takie

szczegółowe rozwiązanie byłoby było by prawie zupełnie nie interesujące. Nie zajmuje nas prawie zupełnie, które np. indywidualne cząsteczki i z jaką prędkością wpadają w danej chwili na oznaczony element ściany zbiornika, gdyż można by to wprawdzie zasadniczo, nie jednak praktycznie stwierdzić. Interesuje nas natomiast w tym przypadku przeciętna siła wywołana przez cząsteczki wpadające na pewien element ściany, gdyż siła ta przedstawia nam łatwo obserwowalną wielkość fizyczną, mianowicie ciśnienie gazu.

Wszystkie prawa fizyki, w które wchodzi takie przeciętne wielkości fizyczne, jak np. ciśnienie gazu, nazywamy statystycznymi prawami fizyki. Przykładem takich praw statystycznych są prawa fizyki praktycznie nieskończenie wielkich gromad atomów, którą to fizykę nazywamy też makrofizyką w przeciwieństwie do mikrofizyki, do fizyki zjawisk związanych z losami poszczególnych atomów. Świat makrofizyki jest to świat dotychczasowej mechaniki i termodynamiki, świat elektromagnetyzmu oraz pewnych działów optyki. Do świata tego należy przytłaczająca większość wszystkich działów i praw fizyki, które znamy ze szkoły średniej.

A teraz zapytajmy się, czy możemy zastosować zasadę przyczynowości do praw fizyki statystycznej. Oczywiście że nie, a to z dwóch powodów: Po pierwsze, założenie zasady przyczynowości wymaga zupełnej znajomości stanu początkowego. Przy prawach statystycznych znamy jednak ten stan tylko z punktu widzenia makro- a nie mikrofizyki, a więc nie we wszystkich szczegółach. Po drugie, twierdzenia praw fizyki statystycznej odnoszą się zawsze tylko do całej serii doświadczeń. Dopiero statystyka całej takiej serii umożliwia nam przecież obliczenie przeciętnych wartości wielkości fizycznych występujących w prawach statystycznych. Jedno jedyne zaś doświadczenie może dać zasadniczo wynik zupełnie niezgodny z przewidywaniami prawa statystycznego, ważnymi przecież tylko dla przeciętnych wartości. Prawa fizyki statystycznej nie określają więc jednoznacznie przebiegu zjawisk indywidualnych, są sprzeczne więc z twierdzeniem zasady przyczynowości o jednoznacznej określoności przebiegu zjawisk fizykalnych.

Fakt, że nie możemy zasadniczo stosować zasady przyczynowości do statystycznych praw fizyki, nie wyklucza jednak praktycznej jej stosowalności przynajmniej do pewnej części praw statystycznych, a mianowicie do praw makrofizyki. I rzeczywiście, prawa makrofizyki posiadają taki kształt, że formalnie czynią zadość zasadzie przyczynowości, jeżeli tylko zapomnimy, że dla niektórych występujących w nich wielkości fizycznych, jak np. dla ciśnienia gazu, należy wstawiać wartości przeciętne. Praktycznie przynajmniej dla tych praw fizyki zasada przyczynowości będzie więc z pewnością spełniona, jeżeli jeden jedyny pomiar takiej wielkości fizycznej da nam wartość liczbową praktycznie równą przeciętnej wartości tej wielkości. Jest rzeczą może nieco nieoczekiwaną i dziwną, że warunek ten dla praw makrofizyki jest zawsze spełniony. Pochodzi o stąd, że w makrofizyce mamy do czynienia, jak już wiemy, z praktycznie nieskończenie wielkimi gromadami atomów.

Przypominając sobie to, co dotychczas powiedzieliśmy, możemy stwierdzić, że zasięg stosowalności zasady przyczynowości w fizyce dotychczasowej przedstawia się następująco: Prawa mikrofizyki czynią ściśle zadość zasadzie przyczynowości. Zasadniczo nie podlegają zasadzie przyczynowości statystyczne prawa fizyki. Do pewnej jednak grupy praw fizyki

statystycznej, do praw makrofizyki, możemy zasadę przyczynowości stosować wprawdzie nie zasadniczo, ale przynajmniej praktycznie.

Poza zakresem wszelkiej, a więc nie tylko zasadniczej, ale też praktycznej stosowalności zasady przyczynowości leży ten dział fizyki statystycznej, który nie pokrywa się z makrofizyką. Jest to fizyka stosunkowo niewielkich gromad atomów, fizyka wahań statystycznych, która na przykładzie teorii ruchów Browna po raz pierwszy rozwinął marian Smoluchowski.

Nim przejdziemy do omówienia zakwestionowania zasady przyczynowości przez fizykę kwantów, zastanówmy się jeszcze nad tym, czy z punktu widzenia fizyki dotychczasowej obalenie tej zasady jest w ogóle do pomyślenia. Przede wszystkim możemy stwierdzić, że nawet jeżeli pewne teorie fizyczne okażą się niewystarczające do opisywania pewnej grupy zjawisk i w ciągu rozwoju fizyki zastąpimy je przez nowe, mimo to tych starych poglądów teoretycznych nie należy uważać za okazy muzealne bez żadnej wartości praktycznej. Możemy się mianowicie nimi zawsze jeszcze posługiwać przy opisywaniu tej grupy zjawisk, dla której opisywania odkryte zostały, przynajmniej jeżeli zamierzamy opisywać zjawiska tylko w pewnym przybliżeniu. Mimo teorii kwantów większość praw fizyki dotychczasowej, przede wszystkim makrofizyki, zachowa więc swe praktyczne znaczenie. W zakresie działania tych praw fizyki dotychczasowej zasada przyczynowości zawsze da się praktycznie zastosować.

Zajmuje nas jednak właściwie nie praktyczna, lecz tylko zasadnicza stosowalność zasady przyczynowości. A co do tego Kant jest zdania, że nie możemy w żaden sposób usunąć zasady przyczynowości z nauk przyrodniczych. Przede wszystkim Kant twierdzi, że sposób myślenia deterministycznego narzucony jest naszemu umysłowi a priori i dlatego usunąć się nie da. I rzeczywiście należy przyznać, że zawsze jest i będzie możliwe, by patrzeć na świat fizyki przez deterministyczne okulary. Zawsze będziemy mogli opisywać zjawiska przyrody deterministycznie, bo jeżeli wszelkie próby odkrycia jakiejś przyczyny zawiodą, to możemy się pocieszać, że ona wprawdzie istnieje, lecz tylko nie daje się doświadczalnie stwierdzić. Wtedy jednak zasada przyczynowości będzie tylko formalnie spełniona, ale nie jako prawo przyrody, którego nieodzowną cechą przecież jest jego doświadczalna sprawdzalność.

Bardziej ważki jest drugi argument, który możemy wysunąć z punktu widzenia Kanta dla poparcia jego tezy. Zasada przyczynowości jest tą zasadą fizyki, która gwarantuje nam regularność zjawisk fizykalnych, a regularność zjawisk jest podstawą założenia, że oprócz naszej jaźni istnieje jakiś przedmiot naszych badań, mianowicie przyroda, której losy opisują nasze teorie fizykalne. Bez determinizmu nie istnieją więc teorie opisujące przebieg zjawisk fizykalnych. Podkreśliliśmy to już na wstępie naszego wykładu i stwierdzimy raz jeszcze, mówiąc o indeterminizmie w teorii kwantów.

A teraz przypatrzmy się stanowisku, jakie zajmuje najnowsza teoria kwantów wobec determinizmu. Założenie zasady przyczynowości odnosi się do pojęcia stanu początkowego. Należy jednak stwierdzić, że nie możemy przejąć żywcem pojęcia stanu z fizyki dotychczasowej do fizyki kwantów. W świecie kwantów każdy pomiar pozostawia po sobie w ogólności trwałe ślady, wywołuje zaburzenia, których nie sposób usunąć. Oznaczając

doświadczalnie np. położenie elektronu nie możemy przez zmniejszenie natężenia oświetlenia zmniejszyć dowolnie zaburzenia wywołanego przez to oświetlenie. Według teorii kwantów światło wpadające na elektron działa nań bowiem tak, jak gdyby było cząsteczką – nazywamy ją fotonem – której własności zależą li tylko od długości fali światła. Zmieniając więc natężenie światła wpadającego zmieniamy tylko ilość fotonów wpadających, a nie ich własności. Dla pewnej długości fali światła wpadającego wynik zderzenia elektronu i fotonu będzie więc niezależny od natężenia światła, a tym samym nie może od natężenia tego zależeć zaburzenie naszego układu. Założenie fizyki dotychczasowej, że zaburzenie możemy zmniejszyć dowolnie, osłabiając tylko odpowiednio oświetlenie, okazuje się więc niesłuszne. Uogólniając powyższy fakt możemy stwierdzić: Każdy pomiar zmienia w fizyce kwantów przynajmniej wartości niektórych zmiennych niezależnych określających dany stan w fizyce dotychczasowej. Ponieważ dla fizyka pojęcie stanu posiada tylko wówczas realne znaczenie, jeżeli każdy stan da się zidentyfikować doświadczalnie, pozostaje nam jako jedyna deska ratunku dla pojęcia stanu wyłącznie wniosek, że w fizyce kwantów dla określenia pewnego stanu nie jest rzeczą konieczną podać ściśle wartości wszystkich zmiennych niezależnych. Żeby przekonać się, jak to jest możliwe, przyjrzyjmy się bliżej pomiarowi położenia elektronu. Chcąc możliwie dokładnie ten pomiar wykonać, użyjemy do oświetlenia elektronu światła możliwie krótkofalowego. Wiemy już bowiem, że nie możemy dokładniej wykonać pomiaru położenia żadnym instrumentem optycznym aniżeli na długość fali światła oświetlającego. Fakt ten ważny być musi też i w teorii kwantów, ponieważ jest on faktem doświadczalnie stwierdzonym, dobrze zresztą znanym każdemu przyrodnikowi, który posługuje się mikroskopem. Jakie niezatarte ślady pozostawi teraz to oświetlenie elektronu tzn. zderzenie fotonu z elektronem? Przed zderzeniem elektron posiada pewną prędkość \mathbf{v} , a więc też i pewien pęd \mathbf{p} , który określony jest przez iloczyn prędkości \mathbf{v} i masy \mathbf{m} elektronu. Podczas zderzenia foton udzieli elektronowi pewną dodatkową prędkość, a więc pewien dodatkowy pęd, który nie jest w ogólności ściśle określony, ale w każdym razie jest tym większy, im mniejsza jest długość fali użytego światła. Stwierdzamy więc: Im krócej-falowego światła użyjemy, tym mniejsza będzie wprawdzie nieokreśloność $\Delta \mathbf{x}$ położenia, ale tym większa będzie też nieokreśloność $\Delta \mathbf{p}$ pędu elektronu po pomiarze. Wydaje się więc rzeczą możliwą, że iloczyn $\Delta \mathbf{x} \cdot \Delta \mathbf{p}$ posiada pewną stałą wartość. I rzeczywiście tak jest. Jeżeli tę stałą oznaczymy przez $\mathbf{h}/2\pi$ to wówczas \mathbf{h} jest wprost podstawową stałą teorii kwantów, tzw. stałą Plancka. Związek $\Delta \mathbf{x} \cdot \Delta \mathbf{p} = \mathbf{h}/2\pi$ jest słynną relacją nieokreśloności, nazywaną też relacją Heisenberga, według nazwiska jej odkrywcy. Do relacji tej doszliśmy w pewnym całkiem specjalnym przypadku. Lecz teoria kwantów żąda, żeby ta relacja spełniona była dla wszystkich w ogóle metod pomiarowych i to nie tylko przy pomiarach położenia, lecz też i przy pomiarach pędu. W tym ostatnim przypadku powiada ona: Im dokładniejsza jest metoda użyta do pomiaru pędu elektronu, tym większą nieokreśloność położenia elektronu powoduje ona po pomiarze. Interesujące są przypadki graniczne. Gdy określimy doświadczalnie zupełnie ściśle położenie, wówczas będzie $\Delta \mathbf{x}$ nieskończenie małe, a więc $\Delta \mathbf{p}$ nieskończenie wielkie, tzn. że wówczas po pomiarze pęd elektronu będzie zupełnie nieokreślony. Analogicznie dochodzimy do wniosku, że każdy pomiar, który ustali zupełnie ściśle pęd, zmienia położenie elektronu tak radykalnie, że w ogóle nie możemy nic o tym powiedzieć, gdzie się on znajduje po pomiarze. Ściśle określić da się więc tylko albo położenie, albo pęd elektronu, lub ogólnie mówiąc, tylko połowa zmiennych niezależnych fizyki dotychczasowej. Stąd wypływa wniosek: W fizyce kwantów określić możemy jednoznacznie stan naszego układu przez ściśle wartości tylko połowy zmiennych niezależnych.

Ale nie każdy stan da się w ten sposób określić. Załóżmy by się o tym przekonać, że oznaczyliśmy położenie elektronu z pewną nieokreślonością tak, że ta nieokreśloność oraz powstająca przez pomiar nieokreśloność pędu spełniają relację Heisenberga. Po tym pomiarze elektron będzie znajdował się w pewnym stanie. Lecz stan ten nie może być identyczny z jednym z takich stanów, gdzie tylko położenie, lub tylko pęd są ściśle określone. Dla stanu bowiem ze ściśle określonym położeniem pęd jest zupełnie nie określony, a dla stanu ze ściśle określonym pędem położenie jest zupełnie nieokreślone. Widzimy więc, że oprócz stanów, które określone są przez ściśle wartości połowy zmiennych niezależnych muszą istnieć stany, dla których wprowadzicie wszystkie zmienne niezależne są dane, ale tylko z pewną nieokreślonością.

Obecnie możemy się przekonać, że pojęcie stanu jest w fizyce kwantów jedynie pojęciem statystycznym. Nie możemy bowiem w ogólności wnioskować z pomiarów jednorazowych, że dany układ znajduje się w pewnym stanie, lecz tylko ze statystyki całej serii pomiarów. Załóżmy, by stwierdzić prawdziwość naszego twierdzenia, że mamy do czynienia z elektronem, którego położenie i pęd znane są z pewną nieokreślonością. Załóżmy dalej, że oznaczyliśmy ściśle położenie tego elektronu – wykonując odpowiedni pomiar – to znajdziemy nasz elektron w pewnym punkcie przestrzeni. Pomiar ten nic nam jednak nie powie o tym, jaka jest nieokreśloność położenia naszego elektronu w danym stanie, a bez oznaczenia nieokreśloności położenia nie możemy zidentyfikować jednoznacznie stanu elektronu. Łatwo natomiast otrzymamy nieokreśloność położenia, jeżeli przeprowadzimy całą serię pomiarów położenia.

Posiadając już pojęcie stanu w fizyce kwantów, możemy sobie wprost postawić pytanie, czy zasada przyczynowości, tak, jak ją wypowiedzieliśmy dla fizyki dotychczasowej, nie jest też ważna i dla fizyki kwantów. Pytamy się więc, czy i w świecie kwantów przez stan początkowy naszego układu są jednoznacznie określone jego dalsze stany, kolejno po nim następujące. Ponieważ na to pytanie fizyka kwantów odpowiada twierdząco, moglibyśmy więc obecnie stwierdzić, że i w fizyce kwantów obowiązuje zasada przyczynowości. Tego zdania są rzeczywiście niektórzy fizycy, przede wszystkim odkrywca kwantów, Max Planck. A jednak przeważająca większość współczesnych fizyków, między nimi Heisenberg i Schrödinger, twierdzi, że świat kwantów jest światem indeterminizmu. Jak możliwa jest taka sprzeczność w poglądach fizyków, będących zresztą wzorem zgodności w swych zapatrywaniach naukowych? Nie ulega kwestii, że zasadę przyczynowości możemy, jak to uczyniliśmy, tak wypowiedzieć, że formalnie obejmuje nie tylko fizykę dotychczasową, lecz też i fizykę kwantów. Ale można też powiedzieć, że tylko formalnie. W świecie kwantów obowiązuje wprowadzicie litera prawa zasady przyczynowości, lecz obca temu światu jest dusza tego prawa. Oczywiście, tak w świecie fizyki dotychczasowej, jak i fizyki kwantów na podstawie znajomości stanu początkowego oprócz możemy przepowiednię stanów następných. W fizyce dotychczasowej jednak przepowiednia stanu oznacza ścisłą przepowiednię wyniku pewnych jednorazowo przedsięwziętych pomiarów. W fizyce kwantów natomiast przepowiednia stanu nic nam zgoła nie może powiedzieć o wynikach jednorazowych pomiarów. Jeżeli więc przewidywanie poszczególných zdarzeń uważamy za najbardziej istotną cechę determinizmu, musimy uznać, że fizyką kwantów rządzi indeterminizm. Nie należy jednak tego określenia niewłaściwie rozumieć. Nie oznacza ono,

że w przeciwieństwie do kosmosu w fizyce dotychczasowej świat kwantów jest chaosem. Również i świat kwantów trzymają w ryzach pewne niezmiennie prawa przyrody, ale prawa te, ze względu na statystyczny charakter pojęcia stanu, nie umożliwiają nam przepowiadania wyników poszczególnych pomiarów. Możemy przeto uważać, że fizyka kwantów jest zasadniczo fizyką indeterministyczną.

Nie wyklucza to jednak możliwości, że przynajmniej praktycznie niektóre jej działy obowiązuje zasada przyczynowości. Możemy to stwierdzić na makrofizyce, wznoszącej się na podstawie teorii kwantów.

Musimy teraz jeszcze wskazać na pewną bardzo ważną konsekwencję, która pociąga za sobą upadek determinizmu dla naszego światopoglądu fizykalnego. W fizyce dotychczasowej mogliśmy przewidywać wyniki poszczególnych pomiarów, mogliśmy więc zawsze mówić o tym, co się rzekomo teraz w świecie dzieje. W fizyce kwantów natomiast możemy przewidywać tylko statystykę całej serii identycznych pomiarów, nie ma więc już zupełnie żadnego sensu mówić o tym, że w danej chwili dzieje się dokładnie to lub owo. W fizyce kwantów nie można więc opisywać losów świata, nie można więc śnić barwnej baśni o przyrodzie, w niej musimy się jedynie zadowolić suchym, rzeczowym reportażem o statystyce wyników naszych doświadczeń. Ograniczenie ostatecznego celu fizyki do opisywania statystyki wyników doświadczeń możemy też uważać za prostą konsekwencję faktu, że doświadczalne badanie układu w fizyce kwantów pozostawia nie dające się zupełnie usunąć ślady badania, tak, że nie możemy wnioskować, co się po pomiarze w przyrodzie dzieje, tylko jak nasz układ reaguje podczas pomiaru, który przeprowadzamy. Wytknięcie tego nowego celu w fizyce możemy jednak też uważać za ustępstwo na rzecz poglądu Kanta, że determinizm jest założeniem, bez którego nie możemy opisywać przebiegu zjawisk w przyrodzie. Rezygnując z tego opisywania możemy oczywiście założyć, że światem rządzi indeterminizm.

A teraz przy końcu jeszcze parę słów o następstwach upadku determinizmu w fizyce dla filozofów. Fizyk musi pogrzebać zasadę przyczynowości. W smutnym tym obrzędzie pogrzebowym wezmą udział również i filozofowie; nie w zbyt wielkim, jak sądzę, pograżeniu smutku. Bo przecież determinizm sprawiał im od tak dawna tyle trosk i kłopotów. Na determinizmie bowiem potykali się filozofowie przy rozwiązywaniu jednego ze swych zasadniczych problemów, problemu wzajemnego oddziaływania na siebie światów: materialnego i duchowego; albo biorąc pod uwagę całkiem szczególny problem, przy zagadnieniu o wolności woli. Nie należy więc oczywiście mniemać, jakoby usunięcie zasady przyczynowości dawało rozwiązanie tych starych zagadnień filozoficznych; w każdym razie filozofowie będą chyba wdzięczni fizykom za to, że im usunęli z drogi przynajmniej jedną przeszkodę.

Tekst został przepisany z przechowywanego w zbiorach rodzinnych maszynopisu w marcu 2007. Dostosowano pisownię do aktualnych wymagań, w kilku miejscach uporządkowano składnię zdania.