

Przygody z fizyką

W ubiegłym roku minęło 100 lat od chwili, gdy Heinrich Hertz wytworzył po raz pierwszy, przewidziane teoretycznie przez Jamesa Maxwella, fale radiowe. Obyło się bez uroczystości. Świat żyje tym, co jest dzisiaj: wynikami meczu "naszej" drużyny, cenami na giełdzie, aktualną modą. Kogo interesuje Maxwell i Hertz, kto zna nazwiska tych, których odkrycia w trwały sposób ukształtowały naszą rzeczywistość? Może to i lepiej, że sława i pieniądze są udziałem piłkarzy i piosenkarzy a nie uczonych -- efektywnie pracować i znajdować w tym przyjemność można tylko w spokoju. Przyjemność to, niestety, nieczęsty gość w naukowej pracowni. Dzień powszedni to mrówcza dłubanina, kroczek po krocisku... Jednak przygody intelektualne zdarzają się i dzisiaj. Ostatnia zdarzyła mi się parę miesięcy temu i o niej właśnie chciałbym opowiedzieć.

Zacząłem się prozaicznie: w lecie pracowałem w Instytucie Astrofizyki Maxa Plancka w pobliżu Monachium nad konstrukcją dużego programu komputerowego służącego do obliczeń własności atomów i cząsteczek metodami mechaniki kwantowej. Z powodu przebudowy sieci komputerowej zmuszony byłem zrobić sobie w tej pracy kilkudniową przerwę. Okazje takie witam z radością -- nareszcie można pomyśleć. W pogoni za wynikami niewielu pracowników nauki znajduje na to czas. Tak naprawdę niewielu fizyków próbuje zrozumieć świat. Szukamy tego, co przydatne, co można policzyć, co otrzymamy w wyniku eksperymentu. Tymczasem zjawiska kwantowe są tak dziwne, odmienne od tego, co znamy z codziennego doświadczenia, że nie można sobie wyobrazić, jak to tak być może. Przestaliśmy się tym przejmować, bo mamy dobry opis matematyczny, umiemy obliczać. Brak zrozumiałego opisu świata martwił jednak bardzo samych twórców teorii kwantów i to do tego stopnia, że odkrywca podstawowego równania mechaniki kwantowej, Erwin Schrodinger, do końca życia powtarzał: "Gdybym wiedział, co z tego wyniknie, nigdy bym się w to nie wdał!" Niedawno zmarły Louis de Broglie, któremu szkolne podręczniki przypisują odkrycie dualizmu cząstkowo--falowego, wcale w żaden dualizm nie wierzył: jak coś może być raz falą a raz cząstką, zależnie od punktu widzenia? Dla niego, podobnie jak i dla Einsteina, fale i cząstki były ze sobą stowarzyszone, fale "wskazywały cząstkom drogę", ale nigdy nie były tym samym obiektem. Dopiero teraz nowoczesna technologia stwarza szansę na doświadczalne rozstrzygnięcie, czy takie "puste fale" naprawdę istnieją. Byłoby to wielkie odkrycie. Na razie doświadczenia są w sferze projektów ale może już wkrótce o tym usłyszymy.

Albert Einstein napisał w jednym z listów: "Myślałem sto razy więcej o problemach kwantowych niż o problemach ogólnej teorii względności." Przez całe swoje życie Einstein kroczył samotną drogą: najpierw jako rewolucjonista, później outsider. Jego najbardziej rewolucyjnym odkryciem nie była wcale teoria względności -- w przypadku szczególnej teorii względności Lorentz a w przypadku teorii ogólnej Hilbert dosłownie deptali mu po piętach -- ale wprowadzenie kwantu światła (nazywamy go teraz fotonem). Było to w 1905 roku, kiedy teoria falowa Maxwella wydawała się opoką, na której opierała się fizyka. Przez prawie 20 lat nikt oprócz Einsteina nie chciał mieć z cząstkami światła nic do czynienia. Na tej koncepcji opierało się oczywiście wyjaśnienie efektu fotoelektrycznego, za co przyznano mu w 1922 roku nagrodę Nobla, lecz nawet wówczas kwanty światła uznawane były za podejrzane. Dopiero doświadczenie Comptona wykonane rok później dostarczyło niepodważalnych dowodów na ich istnienie.

Można Einsteina uznać za dziadka mechaniki kwantowej, jednak niewielu dziadków patrzy z uznaniem na poczynania swoich wnuków. Prorokiem nowej fizyki stał się Niels Bohr i skupieni wokół niego w Kopenhadze młodzi ludzie. Po krótkim okresie entuzjazmu dla ich wyników Einsteina opadły wątpliwości, których nie wyzbył się do końca życia. Jego wielka dyskusja z Bohrem rozpoczęła się w 1927 roku. Kłódamy, jakie rzucał pod nogi Bohra, były jego ulubione eksperymenty myślowe, a głównym celem ataku była zasada Heisenberga i zasada komplementarności. Była to dyskusja fascynująca, lecz nie mogę się tu nad nią rozwodzić, bo mi śpieszno do

mojej przygody. Skupię się więc tylko na faktach niezbędnych do jej zrozumienia. Zarzuty Einsteina wobec teorii kwantów sformułowane zostały najdobitniej w pracy napisanej w 1935 roku wspólnie z Rosenem i Podolskim. Od pierwszych liter nazwisk autorów zarzuty te znane są pod nazwą paradoksu EPR. Wydaje się rzeczą zupełnie oczywistą, że jeśli mamy dwie czastki, oddalone od siebie na dużą odległość i nie działające na siebie żadnymi siłami, to powinny one być całkowicie niezależne. Zgodnie z mechaniką kwantową stanowią one jednak w subtelny sposób jedną całość i to, co zrobimy z jedną z nich, nie pozostaje bez wpływu na drugą. Dwie czastki, chociaż od siebie oddalone, stanowią pewną jedność. "Telepatia" -- brzmiał werdykt Einsteina jeszcze na kilka lat przed śmiercią. Taka możliwość wydawała mu się nie do przyjęcia. A jednak... co by powiedział teraz, kiedy liczne doświadczenia potwierdziły te zdumiewające przewidywania mechaniki kwantowej? Badając związki pomiędzy wynikami jednoczesnych pomiarów na dwóch oddalonych od siebie czastkach (pochodzących jednak ze wspólnego źródła), czyli korelacje pomiarów, udało się udowodnić, że cząstek tych nie można uważać za niezależne. Co więcej, eksperymety grupy francuskiej pod kierownictwem Alaina Aspect'a pokazały, że jeśli czastki wywierają na siebie jakiś wpływ, to robią to z prędkością większą niż prędkość światła!

Nie oznacza to jednak, by dało się dzięki korelacjom kwantowym zbudować telegraf przesyłający informacje z nadświatelnymi prędkościami. Wnioski o zaskakujących korelacjach wysunąć można dopiero wtedy, gdy porównamy rezultaty uzyskane przez oba przyrządy pomiarowe, ale nie wcześniej. W 1982 roku Nick Herbert wysunął propozycję takiej modyfikacji eksperymentów, która powinna pozwolić na przesyłanie sygnałów. Fantaści (a w każdym fizyku zajmującym się takimi sprawami siedzi fantasta) pomyślano natomiast: jeśli jest sposób na przesyłanie informacji z prędkością większą niż prędkość światła to pewnie wszystkie cywilizacje pozaziemskie go stosują, a my usiłujemy nieudolnie podsłuchiwać na falach radiowych. Kto chce czekać wiele lat (lub wiele setek lat) na odpowiedź? Niestety, Tolman już w 1917 roku pokazał, że przesyłanie informacji z prędkością nadświatelną musi prowadzić do istnienia zamkniętych pętli czasowych, a to już naprawdę domena fantastyki (mało) naukowej. Propozycja Herberta już w kilka miesięcy po jej publikacji została pogrzebana lawina dowodów na to, że jego układ nie może działać. Pozostało wprowadzić kilka osób próbujących sprawę ratować i wyłudzić pieniądze od armii (oczywiście amerykańskiej) na ten nowy, cudowny sposób łączności, ale była to prawdziwie wariacka fizyka.

Nakreśliłem już tło, czas więc na przygodę. Przyszedł mi do głowy pomysł bardzo prosty, choć jak zwykle do tej prostoty prowadziła bardzo kręta ścieżka. Przypomnijcie sobie doświadczenie z interferencją. Mamy źródło światła, ekran z dwiema dziurkami, a po drugiej stronie ekranu obserwujemy prążki interferencyjne (nie robię rysunku bo można go znaleźć w podręcznikach). Kwanty światła przechodzą przez dziurki i docierają do ekranu. Gdyby to były kulki, piłeczki pingpongowe lub coś podobnego, to zamiast wielu prążków interferencyjnych otrzymalibyśmy zawsze tylko jeden. Ponieważ światło ma własności falowe to przechodzi przez obie szczeliny jednocześnie, nawet jeśli wysyłamy tylko pojedyncze kwanty które, jak wiadomo, są niepodzielne. Nie rozumiecie jak to jest możliwe? Nie szkodzi. Jak powiedział niedawno znakomity fizyk Richard Feynman nikt nie rozumie jak to jest możliwe, ale tak jest. Gdybyśmy wiedzieli, przez którą szczelinę przeszedł dany foton, obraz interferencyjny nie mógłby powstać. Na tym właśnie polega komplementarność, czyli wzajemne uzupełnianie się obrazu cząstkowego i falowego: nigdy nie widzimy obu aspektów równocześnie. Jeśli podglądamy, przez którą szczelinę przechodzi foton, to widzimy światło jako czastki ale nie widzimy ich interferencji czyli własności falowych. Jeśli nie wiemy nic o drodze, jaka światło dociera do ekranu, to widzimy interferencję czyli własności falowe. Główną ideą Einsteina, Podolskiego i Rosena było użycie par cząstek po to, by dokonując pomiaru na jednej dowiedzieć się czegoś o drugiej. Co się stanie jeśli w naszym doświadczeniu interferencyjnym zamiast źródła pojedynczych fotonów umieścimy źródło par fotonów wylatujących w przeciwne strony? Możemy się wówczas dowiedzieć, którą szczeliną przeleciał foton obserwując foton "od pary". Ponieważ znamy drogę fotonów interferencja nie powinna być możliwa. Jeśli jednak po obu stronach naszego źródła par fotonów

postanowimy obserwować interferencję wówczas nie będziemy już dłużej mieć żadnej informacji o drodze, jaka światło dociera do ekranu, interferencja powinna więc wystąpić. Para fotonów, choć oddalają się one od siebie z prędkością światła, stanowi cały czas pewną całość i stąd, właśnie w takim układzie jak wyżej opisałem, mierzyć można między nimi interesujące korelacje. Niepokoiło mnie jednak, że to, co decyduje się robić w eksperymencie po stronie np. lewej -- wykrywać drogę fotonów lub pozwolić im na interferencję -- wydaje się mieć natychmiastowy wpływ na to, co obserwuje się po stronie prawej, tj. powstanie prążków interferencyjnych lub ich brak. Mamy więc telegraf nadświetlny z jego paradoksalnymi konsekwencjami. Co z tym fantem zrobić?

W praktyce nie dałoby się przeprowadzić doświadczenia z ekranem i szczelinami, ale można zastosować inny układ eksperymentalny, tzw. interferometr Macha--Zehndera. Pokazałem ten układ kilku kolegom, ale ponieważ komputer już działał, nikomu nie chciało się myśleć -- trzeba było przecież pracować. Zabrałem się i ja do pracy licząc na to, że parę miesięcy później, na konferencji w Gdańsku, sprawa się wyjaśni. Konferencja poświęcona była "otwartym problemom w fizyce" i wzięło w niej udział wielu znanych specjalistów zajmujących się podstawami fizyki, przez co rozumie się nie cząstki elementarne czy teorię pola, ale właśnie podobne problemy jak mój. Jadę więc do Gdańska i swój referat kończę prośbą o wyjaśnienie, co tu jest nie tak, gdzie tkwi błąd. Dyskusja niczego jednak nie wyjaśnia. Sesji, na której wygłaszam referat, przewodniczy prof. Franko Selleri, znany krytyk doświadczeń z korelacjami, o których wspominałem powyżej, ale zamiast rozbić w puch moją argumentację odnosi się do niej przychylnie. Dalej więc nic nie wiem, a na dokładkę następnego dnia przy śniadaniu podchodzi do mnie sam Jean--Pierre Vigier i wymachując moją pracą woła: "Monsieur, musimy to przedyskutować, to sprawa poważna". Profesor Vigier głos ma donośny, mówiąc wymachuje wskazującym palcem. Pomimo swoich 67 lat jest najaktywniejszym uczestnikiem konferencji. Okazuje się, że do spółki z prof. Maricem z Jugosławii wymyślili dość zbliżony eksperyment do mojego, ale ich praca nie została jeszcze wydrukowana. Vigier widzi w doświadczeniu z podwójnym interferometrem, jak zaczynam nazywać opisany powyżej układ, możliwość rozstrzygnięcia, która z interpretacji mechaniki kwantowej jest słuszna, w szczególności szansę na udowodnienie istnienia "pustych fal" zapostulowanych przez de Broglie. Proponuje mi napisanie artykułu dla "Physics Letters", pisma, którego jest wydawcą. Umawiamy się za miesiąc w Delfach, na następnej konferencji.

Wracam do swoich komputerów a tymczasem prof. Vigier przed wyjazdem z Polski wyklada na kilku uczelniach i, jak się później dowiaduję, robi reklamę mojego eksperymentu. Dwóch moich gdańskich kolegów, Marek i Jarek, łamią sobie intensywnie głowę, aż wymyślają praktyczny sposób realizacji tego doświadczenia a w końcu dochodzą i do rozwiązania paradoksu. Dowiaduję się o tym dopiero w Delfach, gdzie zjawiam się z pewnymi perypetiami w sam czas, by zdążyć na swój własny referat. Na korytarzu dopada mnie zaraz Vigier i mówi bez żadnego wstępu: "Przykro mi, ale nie będzie działać. Kyprianidis to policzył". No coż, nie spodziewałem się, by mój telegraf nadświetlny naprawdę działał, chciałbym tylko wiedzieć, co mu w tym przeszkadza. Na razie nie dowiaduję się niczego więcej, bo czas na salę wykładową. Ponieważ konferencję zorganizowano z okazji 100--lecia urodzin Erwina Schrodingera mówię o jego poglądach na mechanikę kwantową, a zwłaszcza na relacje pomiędzy całością i jej fragmentami. W przerwie pomiędzy referatami przedstawia mi się Kyprianidis, asystent Vigiera. Z prostych obliczeń, jakie przeprowadził, wyszło mu, że chociaż korelacje są istotnie takie, jak się spodziewałem, to interferencji przy źródle wysyłającym pary fotonów wcale nie będzie, nie ma więc paradoksu. "Nie rozumiem czemu, ale tak wychodzi z rachunków" -- powiedziała. Ponieważ sam tego nie policzyłem, a tylko założyłem jako oczywiste, nie mogłem zaprzeczyć. Nie ma czasu na dłuższą rozmowę, ale wieczorem umawiamy się na kolację. W październiku nawet w Grecji zmierzch zapada szybko a noce są bardzo przyjemne. Rozmawiamy do północy z państwem Vigier (pani Vigier znosi fizyków z podziwu godną cierpliwością) i ich przyjaciółmi ale nie ma okazji napisać tych kilku równań.

Z rana burza. W strumieniach deszczu widzimy biegacza. To Alain Aspect,

trenujący nawet w takich warunkach długodystansowe biegi. Przy śniadaniu Vigier i Maric wpadają na nowy pomysł. Nie wiem jeszcze co o tym sądzić, bo nie rozumiem fizycznych przyczyn braku interferencji w takim układzie. Wyraźnie zależy im na znalezieniu sytuacji, w której mechanika kwantowa, tradycyjnie interpretowana, prowadzi do paradoksalnych konsekwencji. Jest jednak sprawą oczywistą, że jeśli moja propozycja nie prowadzi do paradoksu, to ich praca również. Przy obiedzie koledzy z Gdańska pokazują mi swoją pracę. Nareszcie widzę jakieś wzory a po chwili również fizyczną przyczynę, dla której interferencja fotonów z takiego źródła nie jest możliwa: wynika to z przemyśleń Schrodingera o stosunku części do całości, które omawiałem dzień wcześniej. Para fotonów, powstających w takim źródle, stanowi całość, pomimo tego, że oddalają się od siebie w przeciwnych kierunkach. Części całości nie posiadają samodzielnego bytu dopóki ich nie rozerwiemy, a nie posiadając samodzielnego bytu nie mogą przyczynić się do interferencji, muszą za to wykazywać korelacje. To właśnie istnienie tych nietrywialnych korelacji nie pozwala na przesyłanie sygnałów z nadświetlną prędkością. Widzę teraz, że i nowa propozycja Vigiera nic tu nie pomoże. Spotykamy się w czasie przerw w wykładach i dyskutujemy ostro. Dociera to do niego powoli. Za każdym razem wymyśla nowe elementy mające pokazać, że telegraf nadświetlny da się zbudować. Pomaga mu w tym Maric. Codziennie przy śniadaniu pytają mnie: "Jak tam rezultat dzisiejszego ranka?" Stoje teraz twardo na ziemi ale Vigier jest sprytny. Kiedy chwilowo nie udaje mi się go przekonać mówi: teraz już na pewno zbudujemy telegraf nadświetlny, a za pieniądze z nagrody kupimy sobie jakąś grecką wyspę (sa piękne!) i wspólnie tam zamieszkamy. Cóż, sto lat temu telegraf bez drutu był szalonym pomysłem a teraz mamy telewizję satelitarną. Wieczorem, w czasie ogólnej dyskusji, opowiadam o projekcie swojego doświadczenia. Przy okazji, okazało się, że nie jest to nic nowego. Chyba jako pierwszy, jeszcze przed wojną, rozważał źródło par fotonów w eksperymencie mającym podważyć zasadę Heisenberga słynny filozof Karl Popper, ale zawsze pozostawało to w sferze eksperymentów myślowych. Tym razem sprawa jest bardziej praktyczna, tym bardziej, że zainteresował się nią prof.Aspect, a to właśnie on przeprowadził najdokładniejsze pomiary kwantowych korelacji.

Nie mogę tu z braku miejsca zrelacjonować wielu ciekawych referatów ani licznych dyskusji, które zapełniały nam dni i noce. Większość czasu zajęły mi oczywiście dyskusje z prof. Vigier. Niewielu jest już takich fizyków z powołania, gotowych rozważać nawet najdziwniejsze pomysły. Pewnego dnia krążyliśmy przy świetle gwiazd wokół jakiejs restauracji, na odludziu gdzie nas zawieziono, i patrząc w niebo pomyślałem: to jest to. Użyjmy światła gwiazd by sprawdzić, czy korelacje rozciągają się w nieskończoność (no, prawie). Z radości podskoczyliśmy razem do góry.

To już prawie koniec. Po powrocie do domu napisałem na temat podwójnego interferometru artykuł. Pisząc go zauważyłem, że wszystkie dowody niemożliwości przekazywania sygnałów opierają się na jednym warunku. Dla fotonów jest on zawsze spełniony. Kilka dni po wysłaniu pracy do druku dostałem list od jednego z uczestników konferencji w Delfach wraz z kopią jego pracy. Dla pewnych, dość egzotycznych cząstek (ciężkich bozonów), warunek o jakim myślałem nie może być spełniony. Może jednak...? Utopia telegrafu nadświetlnego nadal kusi.

Włodzisław Duch,
Instytut Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu.