

1. Rozważania o wykładzie

GENOWEFA ŚLÓSAREK

Dwudziestego dziewiątego grudnia 1959 roku na spotkaniu Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego Richard Feynman wygłosił wykład, zatytułowany *Tam w głębi jest mnóstwo miejsca* (*There's Plenty of Room at the Bottom*). Pewien uczestnik tego spotkania stwierdził, że wystąpienie to było dla słuchaczy zupełnym zaskoczeniem (Toumey, 2005). Ze względu na czas jego prezentacji, potraktowano je jako rodzaj żartu.

Wygłaszając wykład, Feynman (1918 – 1988) miał 41 lat i był już wówczas uznawanym za jednego z wiodących fizyków-teoretyków na świecie. Był autorem prac obejmujących wiele dziedzin fizyki. Najważniejszy obszar jego zainteresowań zajmowała mechanika kwantowa, w tym szczególnie elektrodynamika kwantowa, stanowiąca część ogólnej teorii zwanej kwantową teorią pola. Sama elektrodynamika kwantowa jest to „osobliwa teoria światła i materii” (Feynman, 1985a). Prace poświęcone tym zagadnieniom zostały uhonorowane Nagrodą Nobla w dziedzinie fizyki (1965). Feynman zajmował się również zagadnieniami nadciekłości helu oraz powstawaniem polaronów w kryształach jonowych.

Do znanych osiągnięć Feynmana należą także opracowania przygotowane w ramach „Projektu Manhattan” w Laboratorium w Los Alamos oraz udział w komisji prowadzonej przez Williama P. Rogersa, badającej katastrofę promu kosmicznego Challenger (styczeń 1986). O tych okresach działalności Feynman opowiada dość szczegółowo w swoich rozmowach z Ralphem Leightonem (Feynman, 1996, 1997).

Wspomniany wyżej wykład rozpoczyna się zapowiedzią zupełnie nowej dziedziny badań, dającej ogromne możliwości poznawcze. Feynman precyzuje tę deklarację słowami: „To o czym chcę mówić, to problem manipulowania rzeczami i kontroli nad nimi w bardzo małej skali”. Wprawdzie dalej analizuje możliwości zapisu ogromnej ilości informacji zawartej w książkach (np. w *Encyklopedii Britannica*) w bardzo małej objętości, ale zaznacza wyraźnie, że nie chodzi mu o nową propozycję miniaturyzacji. Zwraca uwagę na niedościgniony pierwowzór – zapis informacji w organizmach żywych w postaci podwójnej helisy DNA. W dalszej części rozwija tę myśl, mówiąc: „Przykład biologicznego zapisu informacji w małej skali zainspirował mnie do rozważań o czymś, co w praktyce byłoby też możliwe. W biologii nie chodzi o zwykły zapis informacji, chodzi o działanie z nim związane”. Działanie to, jak wskazuje autor, jest wytwarzaniem nowych produktów w bardzo małej skali przestrzennej (10^{-9} m) – w skali *nano*.

Feynman uważał, że takie działanie byłoby niezwykle ważne przy produkcji nowych komputerów. Nie wskazywał konkretnych rozwiązań technicznych, ale poddał pod rozwagę udoskonalenie mikroskopu elektronowego. Byłby

to wówczas przyrząd bardziej przydatny w badaniach chemicznych i biologicznych. Mówił również o wytwarzaniu nowych maszyn działających tam, w głębi, i zastanawiał się nad możliwością ich efektywnego funkcjonowania.

Z punktu widzenia fizyki, ciekawe są te fragmenty, w których Feynman zwraca uwagę na zmianę szeregu oddziaływań fizycznych. W skali *nano* oddziaływanie grawitacyjne staje się prawie nieistotne. Rośnie natomiast znaczenie oddziaływań van der Waalsa oraz istotnie zwiększa się wpływ napięcia powierzchniowego na przebieg procesów fizycznych. Ze względu na analizę działania układów mechanicznych poddaje pod rozwagę również zjawisko lepkości oraz proces przewodnictwa cieplnego.

Inspiracje

Wydaje się, że inspiracją do wygłoszenia tego wykładu były nowe osiągnięcia biologii z lat 50. XX wieku, w szczególności dotyczące możliwości ukazania w skali *nano* najważniejszych elementów komórki żywej. Był to czas powstania nowej dziedziny badań biologicznych – biologii molekularnej. Feynman przedstawił swoje propozycje sześć lat po opublikowaniu modelu struktury przestrzennej podwójnej helisy DNA (Watson, 1953). Wcześniej pojawiły się doniesienia o możliwości krystalizacji i analizy strukturalnej białek – Nagroda Nobla w dziedzinie chemii (1946) między innymi dla Jamesa B. Sumnera za wykazanie, że enzymy można poddać krystalizacji. Tym samym, otwarto drogę do szczegółowej analizy relacji pomiędzy strukturą

a funkcją biologiczną białka. Jednym z najważniejszych osiągnięć była wówczas praca Linusa Paulinga o strukturze helisy α (Pauling, 1951). Wkrótce, po ogłoszeniu wykładu Feynmana opublikowano dwie przełomowe prace Maxa Perutza i Johna Kendrew o strukturze atomowej dwóch białek – mioglobiny i hemoglobiny (Kendrew, 1960; Perutz, 1960). Ich autorzy opisali szczegółowo procedurę analizy strukturalnej białek.

Publikacja

Zapis wykładu Feynmana opublikowano w lutym 1960 roku w lokalnym czasopiśmie naukowym *Engineering & Science*, wydawanym przez California Institute of Technology. W ciągu kolejnych 20 lat zacytowano tę pracę w literaturze naukowej zaledwie siedem razy (Toumey, 2009). W sześciu z nich odniesiono się jedynie do komentarzy Feynmana na temat zdolności rozdzielczej mikroskopu elektronowego oraz do propozycji miniaturyzacji komputera. Jedynie w pracy Jamesa Krumhansla i Yoh-Han Pao z roku 1979 zauważono i doceniono wizję Feynmana (Krumhansl, 1979). Autorzy, powołując się na kolejne propozycje Feynmana, analizowali ówczesny stan badań nad zjawiskami zachodzącymi w mikroświecie (skala rozmiarów $0,01 \div 10 \mu\text{m}$). Punktem wyjścia dla wielu rozwiązań była dla nich mikroskopia elektronów Augera (*Scanning Auger Microscopy* – SAM) (Todd, 1979).

W roku 1983 Richard Feynman powrócił do prezentowanych wcześniej idei i wygłosił referat, będący do pew-

nego stopnia kontynuacją prezentacji z 1959 roku. Nowe wystąpienie nosiło tytuł *Infinitesimal machinery* (*Maszyneria nieskończenie mała*), jednak miało ono już nieco inny charakter. Poświęcone było głównie budowie elementów scalonych dla techniki obliczeniowej, a w wyraźnie oddzielonej części końcowej odnosiło się do podstaw informatyki. Wykład został opublikowany 1993 roku (Feynman, 1993). Praca ta jest jeszcze mniej znana i do 2004 roku była cytowana zaledwie dwa razy (Toumey, 2008).

Odkrycie Drexlera

Ponowne odkrycie wykładu Feynmana z roku 1959 i jego popularyzację przypisuje się Erikowi Drexlerowi, który powoływał się na zasadnicze tezy Feynmana w swoim artykule z 1981 roku (Drexler, 1981). Drexler zachwyił się ideami zaprezentowanymi przez tegoż fizyka. Powiązał je bardzo ściśle z procesami obserwowanymi w żywych komórkach. Uznał, że maszyny opisywane w wizji Feynmana są podobne do białek, a ich działanie kojarzy się z funkcją biologiczną tych makrocząstek. Bardzo ciekawy opis dokonań i rozważań Drexlera przedstawił Ed Regis (Regis, 2001). Uważa się, że książka Drexlera z 1986 roku *Engines of Creation: The coming era of Nanotechnology* (*Silniki stworzenia: nadchodzi era nanotechnologii*) miała, głównie przez popularyzację nowych koncepcji, istotne znaczenie dla wprowadzenia badań nad manipulacją cząsteczkami do głównego nurtu światowej nauki. Natomiast, poglądy propagowane przez Drexlera

i założony przez niego Foresight Institute zostały uznane za kontrowersyjne.

Za jednego ze zwolenników nowej dziedziny badań, a jednocześnie krytyków Drexlera uważa się Richarda Smalleya, laureata Nagrody Nobla w dziedzinie chemii (1985), odkrywcę nowej odmiany węgla – fulerenów. W latach 2001 – 2003 doszło do publicznej debaty między Drexlerem i Smalleyem (Nanotechnology, 2003). Zapoczątkował ją artykuł zamieszczony przez Smalleya w czasopiśmie *Scientific American* (Smalley, 2001). Przedmiotem dyskusji była możliwość zbudowania urządzeń pozwalających na pozycjonowanie atomów lub cząsteczek tak, by łatwo dochodziło pomiędzy nimi do reakcji chemicznej. Smalley przedstawił swoje stanowisko w tej sprawie formułując dwa problemy – problem grubych palców (*fat fingers problem*) oraz problem lepkich palców (*sticky fingers problem*). Odrzucał możliwość istnienia tego rodzaju maszyny, wskazując na niemożliwe do uniknięcia problemy steryczne (struktura molekularna elementów robota nie będzie się mieściła w obszarze prowadzenia syntezy) i oddziaływanie elementów robota (zbudowanego przecież z atomów) z pojedynczymi atomami dostarczonymi do miejsca syntezy. Drexler bronił się wskazując na działanie rybosomu, na którym zachodzi synteza łańcucha peptydowego, aminokwas po aminokwasie. Biorą w niej udział co najmniej trzy rodzaje cząsteczek – rybosom, jako miejsce prowadzenia syntezy, mRNA, jako odczytywany systematycznie wzorzec kierujący syntezą, oraz tRNA, który doprowadza odpowiedni aminokwas w miejsce prowadzenia syntezy. Nie zaobserwowano, aby w trakcie takiego

procesu pojawiły się jakiegokolwiek ograniczenia steryczne lub zbyt silne oddziaływania. Dyskusja została przerwana w wyniku śmierci Smalleya, w roku 2005.

Wpływ wykładu na dalsze prace badawcze

Znaczenie wykładu Feynmana dla rozwoju nanotechnologii jest do pewnego stopnia kwestionowane. Christopher Toumey, antropolog kultury z Uniwersytetu Stanowego Południowej Karoliny, uważa, że wpływ wykładu Feynmana został mu przypisany retrospektywnie, przy próbie poszukiwania korzeni dla nanotechnologii. Toumey sprowadza zatem znaczenie tego wykładu jedynie do mitu założycielskiego. Podobnie uważają Andreas Junk i Falk Riess z uniwersytetu w Oldenburgu (Toumey, 2007). Toumey przyrównuje nawet wykład Feynmana do pracy naukowej Georga Mendla (Toumey, 2008). W roku 1865 Gregor Mendel opisał doświadczenia dotyczące dziedziczenia cech. Cztery proste zasady sformułowane przez niego zostały ponownie odkryte w latach 1890 przez Hugo de Vriesa, Carla Corrensa i Ericha van Tschermaka. Podobnie koncepcje sformułowane przez Feynmana w 1959 roku zostały ponownie opublikowane i spopularyzowane przez Drexlera w pierwszej połowie lat 80. XX wieku.

Na podstawie szczegółowej analizy cytowań oraz rozmów z wiodącymi naukowcami zajmującymi się zagadnieniami nanotechnologii, Toumey ustalił, że wykład Feynmana nie był powszechnie znany i tym samym nie miał znaczenia dla realizacji wielu istotnych projektów z dziedziny nanotechnologii.

Początki nanotechnologii

Za pierwszy krok w rozwoju nanotechnologii uważa się konstrukcję skaningowego mikroskopu tunelowego (*Scanning Tunneling Microscope* – STM). Dokonali tego Gerd Binnig i Heinrich Rohrer w roku 1981 (Binnig, 1982). Jednakże, mikroskop STM pozwala na badanie jedynie materiałów przewodzących. W 1986 roku Gerd Binnig we współpracy z Calvinem Quate i Christophem Gerberem zmodyfikowali STM. Powstał mikroskop sił atomowych (*Atomic Force Microscope* – AFM), który może być wykorzystany do analizy dowolnej cząsteczki (Binnig, 1986). Toumey oraz Junk i Riess uważają, że wykład Feynmana nie był żadną inspiracją dla konstruktorów STM. Jedynie Conrad Schneiker w szeregu wystąpieniach konferencyjnych i publikacjach powiązał budowę skaningowego mikroskopu tunelowego z koncepcjami Feynmana. Nazwał nawet nowo zaprojektowany przyrząd „maszyną Feynmana”. Binnig i Rohrer wspominają o pojęciu „maszyna Feynmana” jedynie w końcowym fragmencie swojego wykładu noblowskiego (Binnig, 1987).

W swoim pierwszym wykładzie Feynman nie użył wyrażenia *nanotechnologia* i nikt inny w owym czasie tego tak nie pojmował. To, o czym mówił Feynman, było jednak propozycją badań, które obecnie nazywamy nanotechnologią. Powszechnie uważa się, że pojęcie *nanotechnologia* zostało wprowadzone do literatury światowej przez Norio Taniguchi z uniwersytetu w Tokio (Snadhu, 2006). W roku 1974, biorąc udział w jednej z konferencji naukowych, przedstawił on referat *On the basic concept of nanotechnology* (*O podstawach nanotechnologii*). Zdefiniował wówczas nanotech-

nologię jako metodę separacji, konsolidacji lub deformacji materiałów atom po atomie bądź cząsteczka po cząsteczce. Jest to zatem nieco inne spojrzenie od tego, o czym myśleli Feynman lub Drexler. Współcześnie, ze względu na sposób realizacji określonych procedur, tę nową dziedzinę badań dzieli się na co najmniej dwa nurty. Pierwszy stanowią procesy *bottom-up*, czyli tworzenie nowych form – na przykład przez samoorganizację atomów lub cząsteczek. Za prekursora takiego podejścia można uznać Erika Drexlera. Drugi nurt tworzą procedury typu *top-down*. W tym wypadku jest to podejście będące realizacją koncepcji Feynmana, który przecież w swoim wykładzie cały czas mówił o konstrukcji nanomaszyn przez systematyczne pomniejszanie urządzeń makroskopowych.

Realizacja koncepcji Feynmana

Po dwudziestu latach od czasu publikacji pojawili się pierwsi śmiałkowie, którzy podjęli się realizacji projektów zaproponowanych przez Feynmana. W połowie lat 80. XX wieku dwaj uczeni z Uniwersytetu Stanforda, posługując się wiązką elektronów, zapisali pierwszą stronę opowiadania Karola Dickensa *Opowieść o dwóch miastach* na powierzchni azydku krzemu (Newman, 1987). Jak podaje Toumey (Toumey, 2009), 11 listopada 1985 roku poinformowali o tym osiągnięciu Richarda Feynmana i otrzymali od niego przyrzeczoną nagrodę 1000 \$.

W odpowiedzi na rozważania Feynmana o pisaniu w skali *nano* Donald Eigler i Erhard Schweizer wykona-

li napis „IBM” (Eigler, 1990). Dokonali tego manipulując 35 atomami ksenonu, które rozmieścili na powierzchni kryształu niklu, posługując się mikroskopem STM.

Duży fragment wykładu Feynmana poświęcony jest mikroskopii elektronowej. Autor zwraca tam uwagę na słabą, według niego, zdolność rozdzielczą samego instrumentu. W tamtym czasie była to rozdzielczość rzędu 10 nm. Feynman uważał, że powinna być poprawiona przynajmniej stukrotnie. Problem tkwił w elektronowym układzie optycznym. Chodziło o soczewki magnetyczne, które wytwarzały pole magnetyczne o symetrii rotacyjnej (Pennycook, 2006). Konsekwencją wprowadzenia tych elementów była aberracja sferyczna, która powodowała znaczne obniżenie ostrości. Problem znano już w latach 1950 – 1960. Po zastosowaniu odpowiednich korektorów, zarówno w mikroskopii transmisyjnej (TEM)¹, jak i skaningowej (SEM), uzyskano znaczną poprawę obrazu. Rozdzielczość mikroskopii elektronowej sięga obecnie setnych części nanometra, zgodnie z sugestią Feynmana. Mikroskopia elektronowa nie osiągnęła jednak tak wielkiego znaczenia, jakie on przewidywał. Technika ta nie nadaje się do badania próbek DNA czy śledzenia syntezy chemicznej. Powodem jest istotny problem związany z niszczącym działaniem strumienia elektronów, określanym ogólnie jako zniszczenia radiacyjne (*radiation damage*) (Segal, 2009). Zaprojektowano jednak nowe, zna-

¹ TEM – *Transmission Electron Microscopy* – rodzaj mikroskopii elektronowej, w której analizuje się strumień elektronów przechodzących przez badaną próbkę; SEM – *Scattering Electron Microscopy* – rodzaj mikroskopii elektronowej, w której przedmiotem analizy jest strumień elektronów rozproszonych na punktowym obszarze próbki.

czące modyfikacje, jak na przykład tomografia elektronowa, czy mikroskopia elektronowa z dobrą rozdzielczością w czasie. W tym ostatnim przypadku ważny jest detektor, który umożliwia rejestrację do 400 obrazów na sekundę. W przypadku szczegółowych badań łączy się analizę i obrazowanie obiektów prowadzone różnymi technikami – oprócz mikroskopii elektronowej stosuje się analizę rentgenowską, mikroskopię optyczną, czy też spektroskopię lub tomografię magnetycznego rezonansu jądrowego.