

Włodzimierz Zawadzki (1939–2021)

Jerzy Kołodziejczak

Polska Akademia Nauk*, Instytut Fizyki PAN**

Z niedowierzaniem oraz wielkim żalem wysłuchałem w dniu 7 sierpnia 2021 roku przekazanej mi przez Jerzego Langerę telefonicznej wiadomości o odejściu Włodka Zawadzkiego. Z niedowierzaniem, ponieważ miałem z Włodkiem i jego żoną Anią częste kontakty telefoniczne pozwalające mi śledzić stan jego rekonwalescencji. Wszystko wskazywało, że medycyna oraz organizm Włodka powstrzymały rozwój choroby i stan Jego zdrowia się stabilizuje. Tydzień przed śmiercią wystąpił niespodziewany i nadzwyczaj gwałtowny atak choroby, którego osłabiony organizm Włodka nie wytrzymał. Odszedł szlachetny i uczciwy człowiek, wybitny naukowiec, lojalny przyjaciel. Moja znajomość z Włodkiem sięga początku lat 60. XX wieku, kiedy to, po ukończeniu studiów na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, rozpoczął pracę w Zakładzie Technologii Półprzewodników Instytutu Fizyki PAN.

Wspominając Włodka nie chcę cytować jego formalnych danych biograficznych i bibliograficznych. To wszystko można znaleźć w wielu publikowanych dokumentach. Skoncentruję się na mniej znanym początkowym okresie Jego kariery naukowej. W mojej pamięci widzę Go jako aktywnego i twórczego fizyka, który rozpoczął swoją przygodę z nauką nie na jakiejś pustyni naukowej, lecz w konkretnym środowisku naukowym i w konkretnej epoce historycznej. Wniósł wielki wkład do fizyki półprzewodników chociaż tuż po ukończeniu studiów zajmował się technologią boru w Zakładzie Technologii mieszczącym się w budynku przy ul. Zielnej 37. Budynek ten stykał się z budynkiem PASTy (Zielna 39), w którym wówczas znajdowała się siedziba dyrekcji i administracji Instytutu Fizyki PAN. Oba te budynki były całkowicie zniszczone podczas Powstania Warszawskiego i zostały prymitywnymi metodami dostosowane dla potrzeb rozwijającego się Instytutu Fizyki, którego główne pracownie fizyczne zlokalizowane były w pomieszczeniach uniwersyteckich przy Hożej 69. W takich warunkach rozpoczynała się kariera naukowa Włodka Zawadzkiego. Trzeba powiedzieć, że był to okres, w którym fizyka półprzewodników na świecie dopiero zaczynała się intensywnie rozwijać. Przez kilka lat od za-

kończenia II Wojny Światowej zainteresowania fizyków, z wiadomych względów skoncentrowane były głównie na fizyce jądrowej. Dopiero skonstruowanie w 1948 roku przez amerykańskich uczonych pierwszego tranzystora i następnie wykorzystanie go w latach 60., głównie przez Japończyków, do masowej produkcji miniaturowych, przenośnych odbiorników radiowych oraz odtwarzaczy muzyki z kaset magnetofonowych (tzw. walkmanów), spowodowało gwałtowny wzrost zainteresowania fizyką półprzewodników. Przedmiotem tych zainteresowań nie był jednak german ani krzem, dobrze już rozpoznane naukowo i wykorzystywane głównie dla potrzeb rozwijającej się dynamicznie mikroelektroniki. Obiektem badań stały się całkowicie nowe materiały o właściwościach półprzewodnikowych. Były to intermetaliczne związki pomiędzy pierwiastkami III i V grupy układu okresowego, których typowym przedstawicielem był antymonek indu (InSb) oraz związki pomiędzy pierwiastkami II i VI grupy układu okresowego, szczególnie tellurek rtęci (HgTe).

Związki te, dzięki bardzo małej przerwie energetycznej świetnie nadawały się do detekcji promieniowania podczerwonego i tym samym zastosowań militarnych. Jednakże dla fizyków pojawiło się ogromne, całkowicie nowe i niewyeksplorowane pole badań. Obserwowane w tych materiałach zjawiska były zaskakujące i niezrozumiałe na gruncie obowiązującej wówczas teorii półprzewodników. Wszystko było nowe, a każde badanie odkrywcze.

Dynamiczny rozwój tej nowej tematyki stał się możliwy dzięki ogłoszonej w 1957 roku przez amerykańskiego fizyka E. O. Kane'a pracy, w której pokazał, że zależność pomiędzy energią a pędem elektronu w półprzewodnikach odbiegała od uproszczonego, ale powszechnie wówczas stosowanego modelu pasm parabolicznych opisywanych za pomocą masy efektywnej i kwadratowej zależności energii od pędu. Postać tej zależności okazała się analogiczna do wzoru Diraca opisującego energię elektronu relatywistycznego. Była to analogia czysto formalna, u której podstaw nie leżała żadna nowa idea fizyczna w rodzaju einsteinowskiej względności czasu czy koncepcji czasoprzestrzeni. Aby sprawdzić, czy model Kane'a prawidłowo opisze owe dziwne własności tej nowej klasy materiałów półprzewodnikowych, trzeba

*Członek rzeczywisty PAN

**Emerytowany profesor IF PAN

było na nowo zbudować teorię zjawisk elektronowych w półprzewodnikach i sprawdzić, czy teoria ta dobrze opisuje wyniki doświadczalne. To jest właśnie moment, w którym pojawia się Włodek Zawadzki. Ja w tym czasie, na prośbę założyciela Instytutu Fizyki i jego dyrektora Leonarda Sosnowskiego, prowadziłem dla pracowników instytutu wykład na temat tej nowej teorii i własności półprzewodników z tzw. wąską przerwą energetyczną. Celem było zainteresowanie innych tym, co w fizyce półprzewodników staje się ważne. Wśród słuchaczy zauważyłem młodego człowieka, gładko uczesanego na bok z przedziałkiem, który pilnie słuchał wykładu i skrupulatnie go notował. Po kilku wykładach zaczął mnie odwiedzać i prowadzić dyskusje, które zaczynały mieć coraz bardziej twórczy charakter. Nazywał się Włodzimierz Zawadzki.

Latem wyjechałem na urlop do Jastrzębiej Góry i okazało się, że był tam również Włodek. Do końca urlopu, zamiast korzystać z różnych urlopowych przyjemności, siedzieliśmy na plaży wypisując na piasku wzory. Po powrocie do Warszawy przyniósł mi spisane wyniki swoich przemyśleń i obliczeń. Okazało się, że jest to na tyle nowatorskie, iż nadaje się do publikacji. Przedtem zaniósłem te wyniki do Leonarda Sosnowskiego, który natychmiast podjął decyzję o przeniesieniu Włodka z Zakładu Technologii Półprzewodników do Zakładu Fizyki Półprzewodników. Tak więc Włodek z przytupem wkroczył na teren zaczynającej się rozwijać w IFPAN fizyki półprzewodników i nowej grupy badawczej. A był to, jak wspominałem wcześniej, teren ogromny i niezbadany. Wszystko było nowe i wymagające zrozumienia oraz opisu.

Przez parę lat współpracowaliśmy bardzo blisko ogłaszając kilka wspólnych prac. Tematyka była tak obszerna, że Włodek wkrótce znalazł sobie inne interesujące go szczególnie zagadnienia badawcze. Podejmował współpracę z różnymi pracownikami Instytutu, w tym również z młodymi adeptami nauki, którzy, tak jak On niedawno jeszcze, rozpoczynali swoją przygodę z fizyką.

W ten sposób rozwijała się w IFPAN specyficzna tematyka półprzewodnikowa, rozrastał się zespół badawczy. Warszawska grupa półprzewodnikowa zaczynała być znana i wysoko ceniona na świecie; w końcu w środowisku zajmującym się fizyką półprzewodników zaczęto mówić o polskiej szkole fizyki półprzewodników. Włodek pamiętał doskonale o tych początkach swojej kariery naukowej. Często o nich mówił podczas różnych publicznych wystąpień, np. w referacie wygłoszonym na uroczystym seminarium w IFPAN w 2014 roku poświęconym jubileuszowi 50-lecia nadania Mu stopnia doktora: (117) „50 lat od doktoratu: pięć tematów”.

Włodek był człowiekiem ambitnym, wytrwałym i niesłychanie pracowitym. Bez tych cech poważny sukces



Profesorowie Włodzimierz Zawadzki i Jerzy Kołodziejczak (od lewej) – zdjęcie wykonane 17.10.2013 roku w Instytucie Fizyki PAN po uroczystym seminarium poświęconym 60-leciu Instytutu (fot. Anna Zawadzka)

nie jest możliwy. Ponadto był bezkompromisowy w kwestiach prawdy i fałszu. Ta postawa w życiu prywatnym przysporzyła Włódkowi w czasach PRL różnych kłopotów, z których najboleśniejszy, bo utrudniający mu osobiste kontakty z uczonymi zagranicznymi, był zakaz wyjazdów zagranicznych. Trwało to, o ile dobrze pamiętam chyba 2 lata, zanim udało się nam przekonać władze o szkodliwości tej decyzji dla fizyki. Prawda była ważna dla Niego. Rozumiał, że zadaniem nauki i uczonego jest poznawanie prawdy o otaczającym nas świecie i zachodzących w nim zjawiskach. To co jest już znane mało go interesowało. Miał otwarty i błyskotliwy umysł, który kierował go na tereny nowe, jeszcze nie rozpoznane i wymagające badań. Z tego właśnie powodu zajmowanie się technologią boru było dla niego udręką. Gdy zobaczył nowy, niezbadany teren fizyki półprzewodników z wąską przerwą energetyczną, zanurzył się w nim z całym impetem i z całą swoją pracowitością. Wkrótce stał się jednym z liderów w grupie półprzewodnikowej. Był niesłychanie twórczy. Może poszczycić się ogromnym dorobkiem przejawiającym się wielką liczbą cennych publikacji naukowych oraz referatów wygłoszonych na krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych.

Niewątpliwie można Profesora Zawadzkiego zaliczyć do współtwórców polskiej szkoły fizyki półprzewodników. Wyrazem międzynarodowego uznania dla osiągnięć tej szkoły było dwukrotne (1972 i 1988) powierzenie Leonardowi Sosnowskiemu przez Międzynarodową Unię Fizyki Czystej i Stosowanej (IUPAP) zorganizowania, odbywającej się co 2 lata w różnych krajach świata, Międzynarodowej Konferencji Fizyki Półprzewodników. Konferencje były organizowane wspólnym wysiłkiem Instytutu Fizyki PAN i Instytutu Fizyki Doświadczalnej

UW. Włodek należał do Komitetu Organizacyjnego tych konferencji; sprawował ważną funkcję Przewodniczącego Komitetu Programowego konferencji w 1972 roku.

Międzynarodowe uznanie dla osiągnięć naukowych Włodka przejawiało się w bardzo częstym zapraszaniu Go przez najbardziej renomowane naukowe ośrodki zagraniczne. Jednak najczęściej i z pewnym rozrzewaniem wspominał swój pierwszy wyjazd na staż naukowy w MIT, w laboratorium kierowanym przez B. Laxa, wybitnego amerykańskiego fizyka, który jako pierwszy przeprowadził pomiary rezonansu cyklotronowego w germanie i krzemie. Włodek zajmował się tam teorią zjawisk elektronowych w półprzewodnikach, w skrzyżowanych polach elektrycznym i magnetycznym. Wrócił z publikacjami, które legły u podstaw Jego habilitacji. Paweł Pfeffer, bliski współpracownik Włodka, przekazał mi pewną historyjkę związaną z pobytem Włodka w tym ośrodku. Otóż w tym czasie w MIT był na stażu także C. Pidgeon, który zaproponował Włódkowi wspólne opracowanie modelu k_p dla półprzewodników w polu magnetycznym. Włodek uznał, że skrzyżowane pola są ciekawsze i odmówił Pidgeonowi. I w ten sposób, jak z żalem parę razy później sam wspominał, zamiast modelu Pidgeona-Zawadzkiego w podręcznikach mamy model Pidgeona-Browna.

Włodek, zajmując się teoretycznym badaniem różnych zjawisk elektronowych wynikających z modelu Kane'a, używał często terminów takich jak *analogie relatywistyczne czy półwzględność*. Pierwszy z nich był oczywisty. Skoro wzór na energię Kane'a jest formalnie podobny do wzoru Diraca dla elektronu relatywistycznego, to opisane na podstawie modelu Kane'a najprzeróżniejsze zjawiska elektronowe w półprzewodnikach są analogiami zjawisk, jakie powinny występować przy obserwacji swobodnych elektronów o wielkich, relatywistycznych energiach. Problem tylko w tym, że takie eksperymenty ze swobodnymi relatywistycznymi elektronami są albo niesłychanie trudne, albo wręcz niemożliwe do przeprowadzenia, jak bowiem wytworzyć kontrolowany w eksperymencie relatywistyczny gaz elektronowy, jak regulować jego gęstość itd.? W półprzewodnikach, ze względu na małą masę efektywną elektronów, jest to wszystko łatwe do osiągnięcia. Półprzewodnik z małą przerwą energetyczną sam realizuje warunki, w których model Kane'a obowiązuje. Pierwszą z analogii relatywistycznych jaką zaobserwowano jeszcze na przełomie lat 50. i 60. XX wieku, była silna zależność masy efektywnej elektronów w antymonku indu od ich energii. Zależność ta okazała się być idealnie zgodna z modelem Kane'a lub, przez ową formalną analogię, z modelem Diraca. Inną analogią byłyby różne nieliniowe zjawiska optyczne, jak np. generacja wyższych harmonicznych przy pobudzeniu kane'owskiego gazu elektronowego silnym promieniowa-

niem laserowym. W półprzewodnikach (InSb) takie zjawiska były zaobserwowane, natomiast dla swobodnych elektronów relatywistycznych w próżni taka obserwacja byłaby niesłychanie trudna. Na tym właśnie polega wartość prac Włodka Zawadzkiego z całego tego obszaru tematycznego, nazywanego przez Niego analogiami relatywistycznymi. Można powiedzieć, że Włodek modelował w półprzewodnikach zjawiska, które, gdyby zostały zaobserwowane dla swobodnych elektronów w próżni, byłyby zjawiskami relatywistycznymi. Natomiast używany przez Włodka czasem termin *półwzględność* jest czystą i zabawną grą słów w zestawieniu ze słowem *półprzewodnik*. Włodek sam przestrzegał słuchaczy swoich publicznych wystąpień, żeby nie wyciągali z tej nazwy zbyt daleko idących wniosków i że używany przez Niego termin *półwzględność* nie oznacza odkrycia żadnych nowych idei fizycznych w przeciwieństwie do einsteinowskiej szczególnej teorii względności.

Poświęciwszy całe swoje życie fizyce, Włodek nie zasklepił się wyłącznie w badaniach naukowych. Miał wiele innych zainteresowań.



Fizyk teoretyk radzi sobie bez drogich urządzeń. Czasami wystarczą widły... (fot. Jerzy Zawadzki)

Pasjonował go sport, uprawiał judo i grał w tenisa. Był miłośnikiem literatury, w tym również poezji. Nie ograniczał się do biernego korzystania z twórczości innych autorów, ale wniósł i do tej dziedziny własny dorobek twórczy. Kochał muzykę i był częstym bywalcem Opery i Filharmonii Narodowej.

Odszedł człowiek wartościowy, o wszechstronnych zainteresowaniach. W dziedzinie fizyki ciała stałego pozostawił bogaty dorobek, który z pewnością będzie dalej owocował.