



## Nobel 2010 z fizyki – grafen

Adam Rycerz  
Instytut Fizyki UJ

Tegoroczna Nagroda Nobla z fizyki została przyznana za odkrycie zupełnie nieoczekiwane. Komitet Noblowski uhonorował Andre Geima i Konstantina Novoselova, którzy na przełomie 2004 i 2005 roku pokazali, że z pospolitego grafitu można zaskakująco łatwo wypreparować jednoatomowej grubości warstwę, czyli grafen [1]. Ta nowa dwuwymiarowa odmiana krystaliczna węgla nazywana jest często *czudnym materiałem* i jest rozważana jako następcą krzemu, czyli materiał bazowy przyszłej elektroniki. Seria odkryć dotyczących niezwyklej własności grafenu, które opiszę krótko poniżej, nie byłaby możliwa bez znacznie starszych badań teoretycznych nad zachowaniem dwuwymiarowego gazu bezmasowych cząstek Diraca, który stanowi model elektronów w grafenie. Pokazuje to po raz kolejny, że rozwiązania problemów fizyki teoretycznej, pozornie odległych od rzeczywistości, mogą wywrzeć istotny wpływ na życie codzienne.



Andre Geim i Konstantin Novoselov w laboratorium na Uniwersytecie w Manchesterze

W tekstach popularnonaukowych dotyczących fizyki często można znaleźć stwierdzenie: „Wszystkie własności materii mają źródło w prawach mechaniki kwantowej”. Rzadko zdajemy sobie jednak sprawę, że prawdziwa siła liczącej prawie sto lat teorii kwantów nie tkwi jedynie w zdolności wyjaśniania obserwowanych zjawisk przyrody i własności istniejących materiałów. Tkwi ona w mocy przewidywania, dzięki której nowe zjawiska i materiały powstają najpierw w dojrzałej formie w głowach (i komputerach) uczonych, a następnie są odtwarzane w laboratorium. Teoria kwantów jest zatem – żeby użyć obrazowego porównania – dla świata materii nieożywionej tym, czym w przyszłości być może stanie się inżynieria genetyczna dla świata organizmów żywych.

Ogromnemu postępowi, jaki dokonał się w ostatnim ćwierćwieczu w dziedzinie wytwarzania układów mikroelektronicznych, towarzyszyły równie istotne zmiany w światowym systemie obiegu informacji naukowej, takie jak powstanie internetowych baz preprintów czy czasopism typu *open access*. Te dwa czynniki łącznie sprawiły, że droga od równań matematycznych do budowy układu elektronicznego opartego na nowym materiale o niespotykanych wcześniej własnościach znacznie się skróciła. W dalszej części artykułu przedstawię pokrótce historię odkrycia grafenu, nieco miejsca poświęcając także przykładom innych fascynujących materiałów, które – po uprzednich badaniach teoretycznych – zadomowiły się w ostatnich latach w wielu laboratoriach, mają spore szanse trafić „pod strzechy”, a być może również zyskać uznanie Komitetu Noblowskiego w niedalekiej przyszłości.

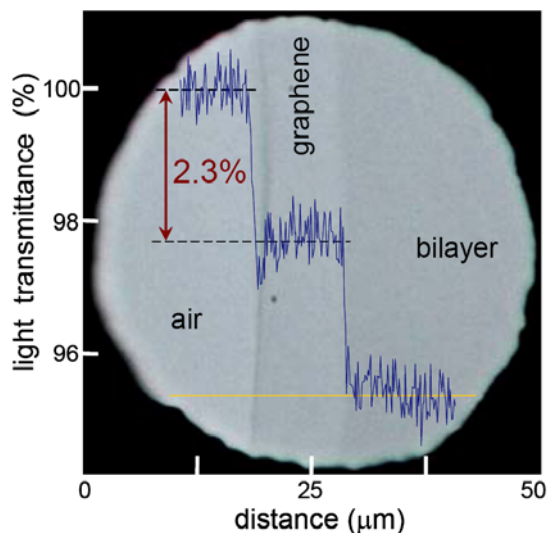
W 1928 roku Paul Dirac podał równanie opisujące ruch elektronu z uwzględnieniem postulatów zarówno mechaniki kwantowej jak i szczególnej teorii względności Einsteina. Równanie Diraca stało się podstawą *relatywistycznej teorii kwantów* i pozwoliło zrozumieć wiele zjawisk, których teoria nierelatywistyczna nie tłumaczyła. Z drugiej strony, teoria Diraca prowadziła do szeregu sprzecznych ze zdrowym rozsądkiem – jak się wtedy wydawało – efektów, jak istnienie antymaterii (pozytonu, odkrytego w 1932 roku przez Carla D. Andersona) czy paradoks Kleina (polegający na tym, że strumień elektronów padający na barierę potencjału o nieskończonej wysokości jest przez nią całkowicie przepuszczany). Przez następne dziesięciolecia, wielu matematyków i fizyków matematycznych badało rozwiązania równania Diraca w różnych sytuacjach. Sporym zainteresowaniem cieszyła się wersja równania opisująca elektrony w świecie dwuwymiarowym, dla której możliwe było otrzymanie szeregu rozwiązań ścisłych. Takie badania wydawały się szczególnie odległe od rzeczywistości: nasz świat jest przecież, jak każdy wie, trójwymiarowy!

Trójwymiarowe były też obie znane do połowy lat 80. XX wieku formy krystaliczne węgla: grafit i diament. Pierwsza z nich, znacznie częściej występująca w przyrodzie, zbudowana jest z cienkich warstw (o grubości zaledwie jednego atomu), z których każda ma strukturę przypominającą plaster miodu. Warstwy są stosunkowo słabo związane ze sobą, dzięki czemu można je łatwo przesuwac (co wykorzystujemy pisząc ołówkiem). W 1984 roku Gordon W. Semenoff pokazał, że elektrony w pojedynczej warstwie grafitowej (nazwanej później *grafenem*) opisuje równanie Diraca w jego najprostszej wersji: dla cząstek bezmasowych w świecie dwuwymiarowym. Możliwość izolacji warstwy grafitowej wydawała się jednak wówczas mało realna. Wkrótce nastąpił przełom w naszej wiedzy na temat odmian węgla: obok grafitu i diamentu pojawiły się **fullereny** (1985) i **nanorurki** (1990). Dlaczego na odkrycie grafenu trzeba było czekać kolejne piętnaście lat? Zapewne przyczyną było przekonanie, że taki ściśle dwuwymiarowy obiekt nie może istnieć w naszym świecie: żaden znany mate-

riał nie tworzył warstw jednoatomowej grubości, które pozostawałyby stabilne po oderwaniu od podłoża.

Odkrycia grafenu dokonali uczeni z Uniwersytetu w Manchesterze, Andre Geim i Konstantin Novoselov, ze współpracownikami z Rosji i Holandii. W pracy opublikowanej w *Nature* w 2005 roku [2] opisali m.in. działanie tranzystora polowego zbudowanego w całości z grafenu, w którym możliwa jest płynna zmiana koncentracji nośników elektryczności (poprzez przyłożenie zewnętrznego pola elektrycznego), a nawet zamiana elektronów na dziury. Urządzenie takie nie ma odpowiednika w elektronice opartej na krzemie. W tej samej pracy opisano pomiar tzw. *masy cyklotronowej*, czyli efektywnej masy, która charakteryzuje dynamikę cząstki w polu magnetycznym. Pomiar ten stanowi bezpośredni dowód, że w grafenie mamy do czynienia z bezmasowymi elektronami Diraca.

Wkład Geima i Novoselova w fizykę materii skondensowanej trudno przecenić. Nie polegał on tylko na odkryciu niezwykle ciekawego materiału, lecz również na – potencjalnie znacznie ważniejszej – próbie zmiany zwyczajów panujących w wielu dziedzinach nauki. Uczeni postanowili bowiem upowszechnić wszelkie szczegóły opracowanej przez siebie metody izolacji grafenu, poprzez filmy instruktażowe i szkolenia dla członków konkurencyjnych zespołów badawczych. Dzięki temu, badania grafenu niemal natychmiast podjęło kilkadziesiąt zespołów z całego świata, a eksplozja publikacji i cytowań dotyczących tego materiału nie ma precedensu. W krótkim czasie potwierdzono przewidywania teoretyczne dotyczące szeregu własności, z których najciekawsze wydają się przewodnictwo elektryczne i współczynnik absorpcji światła widzialnego: obie wielkości wyrażają się wyłącznie poprzez fundamentalne stałe przyrody, czyli ładunek elektronu  $e$ , prędkość światła w próżni  $c$  i stałą Plancka  $h$  [3]. Dużemu przewodnictwu monowarstwy  $\sigma = 4e^2/\pi h = 1/(20,3 \text{ k}\Omega)$  towarzyszy bardzo mały współczynnik absorpcji światła ( $\pi\alpha = 2,3\%$ , gdzie  $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137,036$  to stała struktury subtelnej), co czyni grafen obiecującym budulcem połączeń elektrycznych w wyświetlaczach LCD czy e-papierze. Wykonanie pomiaru absorpcji było możliwe dzięki uzyskaniu względnie dużych jednorodnych warstw grafenu, które były podtrzymywane przez brzegi otworów o średnicach do  $50 \mu\text{m}$  w metalowej folii o grubości  $20 \mu\text{m}$ . Pomimo, że obecnie niepewność pomiarów zarówno przewodnictwa elektrycznego jak i absorpcji światła jest zbyt duża, aby mogły one posłużyć do wyznaczania stałych przyrody z dokładnością metrologiczną, warto podkreślić, że z grafenem wiążą się aż dwa nowe makroskopowe zjawiska kwantowe.



Fotografia przedstawia otwór o średnicy 50  $\mu\text{m}$ , zakryty częściowo przez pojedynczą i podwójną warstwę grafenu. Nałożony wykres pokazuje pomiar natężenia światła wzdłuż jasnej linii u dołu rysunku. Reprodukacja z pracy [3].

Spośród rozważanych obecnie zastosowań grafenu na pierwszy plan wysuwają się te, które mają związek ze *spintroniką*. W odróżnieniu od klasycznej elektroniki, która operuje ładunkiem elektronu i powoli zbliża się do granic wyznaczonych przez mechanikę kwantową (słynne prawo Moora pozwala oczekiwać, że obecny rozwój wydajności układów elektronicznych zatrzyma się około roku 2025), spintronika koncentruje się na innej własności elektronu: tzw. *spinie* (czyli momencie magnetycznym). Obrót spinu wymaga użycia znacznie mniejszej energii niż przemieszczenie ładunku, dlatego teoretyczne granice rozwoju spintroniki leżą daleko poza analogicznymi granicami dla elektroniki klasycznej.

Grafen wydaje się szczególnie dogodnym materiałem do zastosowań w spintronice ze względu na wysoki stopień koherencji kwantowej: elektron, wstrzyknięty do grafenu przez zewnętrzną elektrodę (wykonaną z metalu ferromagnetycznego) zachowuje swoją tożsamość (i ustawienie spinu) przez bardzo długi czas. Co więcej, elektrony w grafenie posiadają dodatkowe liczby kwantowe (*pseudospiny*), na których można wykonywać identyczne operacje jak na spinie. Jedną z wersji takiej *pseudospintroniki*, operuje na tzw. indeksie doliny: liczbie kwantowej numerującej nierównoważne punkty w przestrzeni pędów, w których może znajdować się elektron (nazywane punktami Diraca). Szereg prac teoretycznych pokazuje, że doskonałość działania elementarnych układów może być znacznie wyższa niż analogicznych urządzeń rozważanych w standardowej spintronice. Co ciekawe, dzięki stworzeniu nowej koncepcji elektroniki kwantowej dla grafenu niedawno zauważono, że podobne operacje na wspomnianym indeksie doliny powinno dać się wykonywać w przypadku elektronu uwięzionego w nanorurce węglowej [4]. Taka możliwość wydaje się szczególnie obie-

cująca, gdyż technologia budowy układów zawierających nanorurki węglowe jest dopracowana w znacznie większym stopniu niż podobne technologie dla układów grafenowych.

Na koniec warto wspomnieć o innych potencjalnych materiałach elektroniki przyszłości, których historia bardzo przypomina opisaną powyżej. W 1971 roku Dyakonov i Perel opisali teoretycznie zjawisko nazwane później *spinowym efektem Halla* (nazwa pochodzi od fizyka amerykańskiego J.E. Hirscha.) Jeśli przez prostokątną próbkę wykonaną z odpowiedniego materiału przepuścimy prąd elektryczny, na krawędziach pojawią się przeciwnie skierowane momenty magnetyczne. W odróżnieniu od klasycznego efektu Halla, efekt spinowy zachodzi bez zewnętrznego pola magnetycznego, a jego źródłem może być np. rozpraszanie elektronów na atomach domieszek wprowadzających oddziaływanie typu spin-orbita. Spinowy efekt Halla został zaobserwowany doświadczalnie niemal równocześnie z odkryciem grafenu pod koniec 2004 roku [5]. Szybko stał się jednym z głównych efektów wykorzystywanych w układach spintronicznych.

Trudno dzisiaj jednoznacznie stwierdzić, które z opisanych materiałów i zjawisk znajdą zastosowanie w elektronice przyszłości. Być może będą to jeszcze inne, nieznane dziś układy? Jest jednak pewne, że stworzony przed blisko stu laty aparat matematyczny teorii kwantów odegra kluczową rolę w ich projektowaniu.

### Literatura

- [1] B. Trauzettel, *Od grafitu do grafenu*, Postępy Fizyki, **58** zeszyt 6/2007, s. 250.
- [2] K.S. Novoselov i in., *Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene*, Nature **438** (2005), s. 197.
- [3] R.R. Nair i in., *Universal Dynamic Conductivity and Quantized Visible Opacity of Suspended Graphene*, Science **320** (2008), s. 1308.
- [4] A. Pályi, G. Burkard, *Disorder-mediated electron valley resonance in carbon nanotube quantum dots*, arXiv:1010.4338 (2010).
- [5] Y.K. Kato i in., *Observation of the Spin Hall Effect in Semiconductors*, Science **306** (2004), s. 1910.