

## Topologiczny Nobel

Nagrodę Nobla z Fizyki za rok 2016 odebrali Davis J. Thoules (połowę), F. Duncan M. Haldane (ćwierć) oraz J. Michael Kosterlitz (ćwierć). Zostali oni nagrodzeni za *teoretyczne odkrycia topologicznych przemian fazowych oraz topologicznych stanów materii*.

Ich przewidywania były zaskoczeniem dla specjalistów, włącznie z samymi autorami.

Od lat trzydziestych dwudziestego wieku wiadomo, że wyjaśnianie własności materii skondensowanej wymaga rozpatrywania aspektów kolektywnych. Najprościej można powiedzieć, że nagrodzone badania wyniosły tę kolektywność na wyższy poziom abstrakcji i doprowadziły do zaskakujących przewidywań, które nie tylko zostały spektakularnie potwierdzone doświadczalnie, ale już znalazły zastosowania praktyczne oraz bardzo dobrze rokują na przyszłość.

W pierwszej ze wskazywanych prac [1] Thoules i Kosterlitz przewidzieli nowy rodzaj przemiany fazowej. Wcześniej ugruntował się pogląd, że przemiana fazowa zawsze wiąże się ze zmianą symetrii. Np. woda, zamarzając, zmienia grupę symetrii z nieskończonej, obejmującej dowolne obroty i translacje, na skończoną grupę krystalograficzną, dopuszczającą tylko obroty o określonej wartości kąta oraz translacje o wielokrotność stałej siatki kryształu. Innym przykładem jest przemiana metalu w ferromagnetyk przy przekraczaniu temperatury Curie w trakcie chłodzenia. W tym przypadku materiał jest trójwymiarowy, a parametr uporządkowania (magnetyzacja) jest jednowymiarowy. Natomiast do opisu zjawisk takich jak nadprzewodnictwo czy nadciekłość konieczne jest rozpatrywanie zespolonego parametru uporządkowania, co jest konsekwencją kwantowej natury tych makroskopowych zjawisk.

W fizyce fazy skondensowanej jest jednak wiele sytuacji, w których efektywny wymiar przestrzeni jest mniejszy od trzech. Wtedy termodynamiczne fluktuacje niszczą uporządkowanie nawet w temperaturze bliskiej zera bezwzględnej. A przy braku uporządkowania nie może być przemiany fazowej. Tak się przynajmniej wszystkim wydawało. Jednak w przypadku, gdy parametr uporządkowania jest zespolony, okazało się [1], że nie można zapomnieć o kolektywnym zachowaniu polegającym na możliwości tworzenia się wirów. Ignorowano to, bo energetyczny koszt takiej konfiguracji skaluje się jak logarytm stosunku rozmiaru próbki do rozmiaru oka wiru. To, czego nie zauważano, to możliwość tworzenia się par wir–antywir. Z daleka sumaryczna wirowość takiej pary jest zerowa, a energetyczny koszt jej utworzenia jest niewielki, proporcjonalny do logarytmu stosunku separacji wir–antywir do rozmiarów oka wiru.

Niedostrzeżone wcześniej topologiczne przejście fazowe (przejście Kosterlitz–Thoulesa) pojawia się w temperaturze, przy której energia swobodna (energia wewnętrzna pomniejszona o iloczyn temperatury i entropii) się zeruje. Powyżej tej temperatury tworzą się pojedyncze

wiry, poniżej występują jedynie pary wir–antywir. Jest to pierwsze odkryte przejście fazowe, w którym nie zmienia się symetria układu. Mechanizm ten jest uniwersalny. Stosuje się do wszystkich systemów, które można uważać za dwuwymiarowe z zespolonym parametrem uporządkowania.

Kolejnym zaskakującym odkryciem teoretycznym [2] było wyjaśnienie kwantowego efektu Halla. Ta, doświadczalnie stwierdzona, kwantyzacja przewodności gazu elektronowego efektywnie ograniczonego do dwuwymiarowej warstwy i poddanego silnemu polu magnetycznemu o kierunku prostopadłym do płaszczyzny warstwy, okazała się być czysto topologicznym efektem. Kolejne skoki przewodności związane są z przejściami od konfiguracji bez dziur (jak sfera) do mającej dokładnie jedną dziurę (jak torus), dwie dziury itd. Przy czym mierzone wartości przewodności są kompletnie niezależne od konkretnej realizacji. Zgodność z tym topologicznym przewidywaniem została potwierdzona z dokładnością lepszą niż jedna miliardowa. Pozwoliło to na zdefiniowanie precyzyjnego wzorca oporu elektrycznego (który jest odwrotnością przewodności).

Jeszcze bardziej zaskakujące rezultaty zapoczątkowała praca [3]. Okazało się, że przy rozpatrywaniu modeli jednowymiarowych, takich jak łańcuchy spinów o konfiguracji antyferromagnetycznej (sąsiednie spiny skierowane przeciwnie) własności łańcuchów spinów połówkowych są inne niż całkowitych. Te ostatnie okazują się topologiczne w tym sensie, że własności zależą nie od lokalnych interakcji, tylko od łańcucha jako całości. Okazało się, że w takim łańcuchu generuje się tzw. topologiczny fluid podobny jak w przypadku kwantowego efektu Halla.

Topologiczne stany materii są uważane za jeden z najciekawszych kierunków badań fizyki fazy skondensowanej. Bada się teoretycznie oraz tworzy doświadczalnie topologiczne izolatory, przewodniki, nadprzewodniki itp. Za każdym razem topologiczność odnosi się do rozpatrywania własności i wzbudzeń próbek materii jako całości. Badane stany są jednocześnie skrajnie abstrakcyjne i w pełni realne. Wykorzystując podejście zaproponowane przez Feynmana, prowadzi się symulacje kwantowe stanów za pomocą kondensatów Bosego–Einsteina.

Można powiedzieć, że fizyka fazy skondensowanej pozwala na tworzenie nowych rzeczywistości o zaskakujących własnościach. Ta zabawa prowadzi do konkretnych zastosowań, a może kiedyś pomoże w zrozumieniu tej jednej rzeczywistości, w której żyjemy.

Piotr ZALEWSKI

- [1] J.M. Kosterlitz, D.J. Thouless, *Long range order and metastability in two dimensional solids and superfluids (Application of dislocation theory)*, *Journal of Physics C: Solid State Physics*, **5**(11):L124, 1972
- [2] D.J. Thouless, Mahito Kohmoto, M.P. Nightingale, M. Den Nijs, *Quantized hall conductance in a two-dimensional periodic potential*, *Physical Review Letters*, **49**(6):405, 1982
- [3] F.D.M. Haldane, *Continuum dynamics of the 1-D Heisenberg antiferromagnet: Identification with the  $O(3)$  nonlinear sigma model*, *Physics Letters A*, **93**(9):464, 1983