

Aktualności (nie tylko) fizyczne

W tym roku Nagrodę Nobla z Fizyki odbiorą w Sztokholmie panowie Robert B. Laughlin, Horst L. Störmer i Daniel C. Tsui za *odkrycie nowej formy kwantowej cieczy ze wzbudzeniami o ułamkowym ładunku*, czyli za zaobserwowanie (H.L.S. i D.C.T.) oraz wytłumaczenie (R.B.L.) tzw. anomalnego (ułamkowego) kwantowego zjawiska Halla.

Zacznijmy od końca, to znaczy od początku. W 1879 roku Edwin H. Hall odkrył, że jeżeli płytkę przewodnika umieścimy w polu magnetycznym skierowanym prostopadle do kierunku przepływu prądu, to na bokach przewodnika (w kierunku prostopadłym zarówno do prądu, jak i do pola magnetycznego) wygenerowane zostanie napięcie, noszące dziś jego nazwisko. Efekt związany jest z odchyleniem nośników prądu przez pole magnetyczne. Zamiast napięcia Halla częściej mówi się o oporze Halla R_H zdefiniowanym jako iloraz napięcia Halla i prądu płynącego wzdłuż przewodnika. Zmierzenie tej wielkości pozwala na wyznaczenie koncentracji nośników prądu N (na jednostkę powierzchni prostopadłej do pola magnetycznego) z prostej zależności

$$R_H = B/(Ne),$$

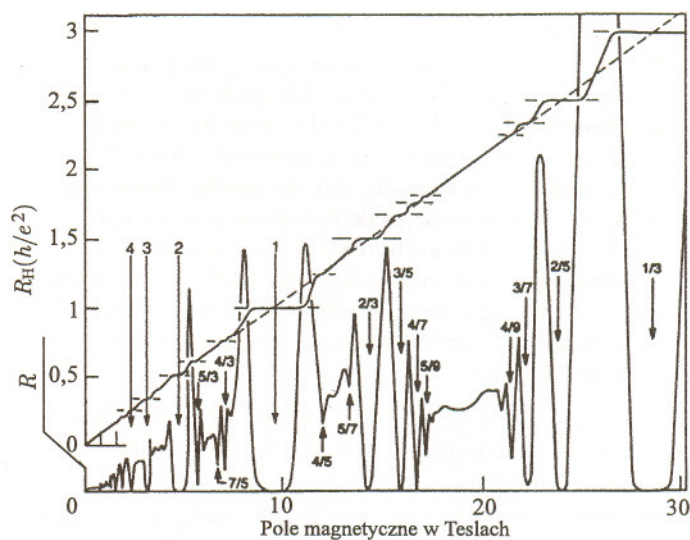
gdzie B jest indukcją pola magnetycznego, a e ładunkiem elementarnym.

W końcu lat siedemdziesiątych okazało się, że powyższe prawo przestaje obowiązywać dla dwuwymiarowych warstw przewodzących, schłodzonych do temperatury bliskiej zera bezwzględnej i umieszczonych w bardzo silnym polu magnetycznym. Warstwy takie można otrzymać na styku dwóch półprzewodników. Zależność oporu Halla od natężenia pola magnetycznego okazała się tylko w przybliżeniu liniowa. W pewnych przedziałach wartości natężenia pola B opór Halla jest w każdym z nich stały i dokładnie równy

$$R_H = (h/e^2)/n,$$

gdzie $n = 1, 2, 3, \dots$, podczas gdy normalny opór wzdłuż przewodnika jest równy zero. Efekt ten nazwano kwantowym zjawiskiem Halla i w 1985 roku przyznano jego odkrywczy, Klausowi von Klitzingowi, Nagrodę Nobla z Fizyki. Wyjaśnienie tego fenomenu na gruncie mechaniki kwantowej jest stosunkowo proste. Podobnie jak w modelu atomu wodoru Bohra skwantowany jest moment pędu elektronu, tak dla ruchu elektronu w jednorodnym polu magnetycznym skwantowany jest strumień natężenia tego pola przypadający na orbitę elektronu. Dla dwuwymiarowego gazu elektronowego kolejnym orbitom odpowiadają kolejne dyskretne poziomy energetyczne, zwane poziomami Landaua. Kwantowe zjawisko Halla (znikanie normalnego oporu przewodnika) pojawia się, gdy wartość natężenia pola magnetycznego zbliża się do wartości odpowiadającej całkowitemu zapełnieniu n poziomów Landaua. Elektrony są fermionami, tzn. żadne dwa nie mogą być w tym samym stanie kwantowym. Zapełniony poziom Landaua można sobie wyobrazić jako wypełnioną salę kinową. Opór elektryczny znika, gdyż elektrony nie mają się gdzie rozpraszać. Wolne krzesła są tylko na balkonie, a w chłodzie zera bezwzględnej nikt nie ma wystarczająco dużo energii, aby się tam dostać.

W 1982 roku dwóch tegorocznych laureatów zaobserwowało dodatkowe plateau na wykresie zależności oporu Halla od natężenia pola magnetycznego odpowiadające $n = 1/3$, czyli zapełnieniu pierwszego poziomu Landaua w jednej



Zależność oporu Halla R_H oraz zwykłego oporu R od natężenia pola magnetycznego dla dwuwymiarowego gazu elektronowego. Diagonalna linia przerywana odpowiada klasycznemu przewidywaniu $R_H = B/(Ne)$. Każdemu plateau R_H odpowiada minimum zwykłego oporu R . Wartość parametru n , wyliczoną ze wzoru $1/n = R_H/(h/e^2)$, przedstawiono za pomocą liczb ze strzałkami. Szczególnie znaczący jest stan odpowiadający $n = 1/3$ (najbardziej na prawo), pierwszy zaobserwowany anomalny kwantowy efekt Halla.

J.P. Eisenstein, H.L. Störmer, *Science* 22/06/1990 str. 1511.

trzeciej. Gdyby trzymać się analogii z efektem odkrytym przez Klitzinga, odpowiadałoby to obecności nośników prądu o ładunku $e/3$. Odkrywczy anomalnego (ułamkowego) zjawiska Halla wyrazili przypuszczenie, że wyjaśnienie tego całkowicie nieoczekiwanego odkrycia będzie wymagało uwzględnienia kolektywnego zachowania się elektronów w dwuwymiarowej warstwie.

Eleganckie i zaskakujące rozwiązanie podał w 1983 roku trzeci z laureatów. Okazuje się, że elektrony-płaszczaki umieszczone w bardzo silnym polu magnetycznym potrafią zmusić się nawzajem do połączania nieparzystej liczby kwantów strumienia pola magnetycznego, stając się nowym rodzajem cieczy kwantowej, której nadciekłość wyjaśnia znikanie normalnego oporu magnetycznego. Natomiast wzbudzenia tego szczególnego stanu materii rzeczywiście zachowują się jak pseudocząstki obdarzone ułamkowym ładunkiem elektrycznym.

Ich obecność pozwala na wyjaśnienie całej bogatej struktury zależności oporu Halla i normalnego oporu elektrycznego od natężenia pola magnetycznego, ukazanych na rysunku.

Moim zdaniem nie bez wpływu na przyznanie tegorocznej Nagrody Nobla było ogłoszenie w zeszłym roku wyników dwóch prac doświadczalnych dowodzących w prosty i nie budzący wątpliwości sposób realności tych pseudocząstek jako nośników prądu elektrycznego.

Kwantowe zjawisko Halla cały czas jest intensywnie badane zarówno od strony doświadczalnej, jak i teoretycznej. Narzuca się np. pytanie o istnienie analogii między pseudocząstkami Laughlina a kwarkami, innej niż tylko ułamkowy ładunek.

Piotr ZALEWSKI

<http://www.nobel.se/announcement-98/physics98.html> Szum Schottky'ego pseudocząstek Laughlina: *Nature* 11/09/1997 str. 119 wraz z referencjami