



Nagroda Nobla z fizyki w 2016 roku, czyli o przejściach fazowych i zjawiskach krytycznych nowego typu

Józef Spalek, Danuta Goc-Jaęło
Instytut Fizyki UJ

Nagrodę Nobla z fizyki w 2016 roku otrzymało trzech fizyków pochodzenia brytyjskiego, pracujących w Stanach Zjednoczonych: David J. Thouless z University of Washington w Seattle (połowę nagrody), a drugą połowę otrzymali wspólnie J. Michael Kosterlitz z Brown University w Providence oraz Duncan M. Haldane z Princeton University (fot. 1), za „odkrycia teoretyczne topologicznych przejść fazowych oraz topologicznych faz materii”. Nagroda wynosi 8 mln koron szwedzkich (około 3,7 mln złotych). Zapytajmy się więc, na czym polegają te odkrycia i jak mieszczą się one w całości fizyki.



David J. Thouless

J. Michael Kosterlitz

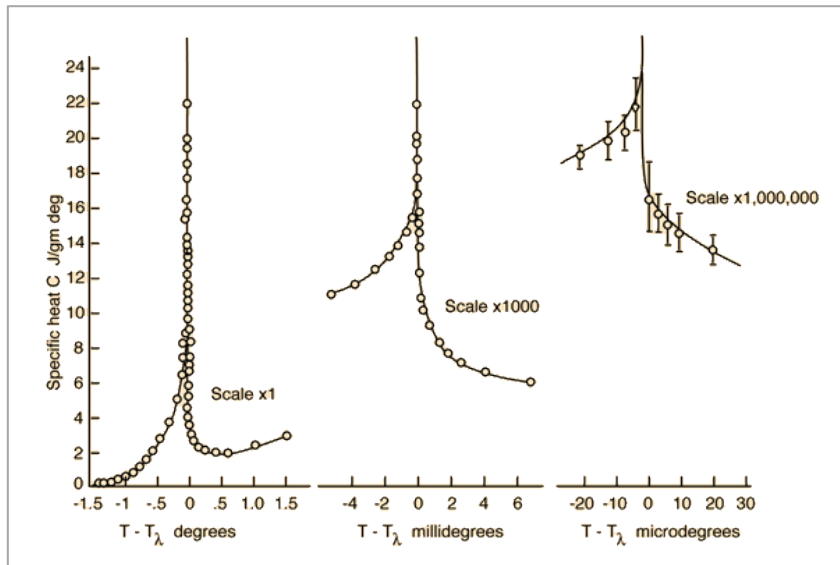
F. Duncan M. Haldane

Fot. 1. Laureaci Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki w 2016 roku

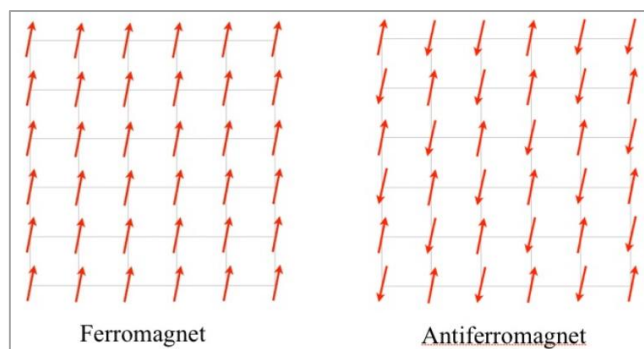
1. Wstęp: koncepcja złamania symetrii i parametru porządku

W fizyce materii skondensowanej (i nie tylko) podstawowymi koncepcjami są przejścia fazowe (z towarzyszącymi im zjawiskami krytycznymi, czyli osobliwościami mierzalnych wielkości fizycznych) oraz tzw. spontaniczne złamanie symetrii. Przejście fazowe ciągłe polega bowiem na pojawieniu się w sposób spontaniczny uporządkowania (np. przy obniżaniu temperatury czy zwiększaniu ciśnienia wywieranego na układ). Koronnym przykładem jest tu układ oddziałujących między sobą atomowych momentów magnetycznych (spinów), które przy ochładzaniu układu porządkują się spontanicznie (bez zewnętrznego pola magnetycznego) w tzw. temperaturze krytycznej (Curie) T_c . Co najistotniejsze, przy podejściu do tej temperatury T_c , zarówno od dołu jak i od góry, fizyczne własności układu, takie jak np. ciepło właściwe, wykazują istotne osobliwe

zachowanie, czyli że nie jest to w żadnym przypadku ewolucja ciągła układu ze zmianą temperatury. Na rys. 1 przedstawiono takie osobliwe zachowanie ciepła właściwego dla innego przypadku, ciekłego helu-4 (^4He), przy przejściu do stanu nadciekłego. Zauważmy, że charakter logarytmiczny ($\sim \ln|T - T_c|$) rozbieżności ciepła właściwego w punkcie T_c ma miejsce na wszystkich dostępnych skalach temperatur (od kelwinów do mikrokelwinów). To przejście fazowe ma taki sam charakter w przypadku układu spinów, a na rys. 2 przedstawiono dwa najprostsze typy uporządkowania spinowego dla $T < T_c$: ferromagnetycznego (ze spinami równoległymi) oraz antyferromagnetycznego (ze spinami na przemian antyrównoległymi). Oczywiście, dla $T > T_c$ spiny są nieuporządkowane i „rozmrózone”, tj. każdy z nich może się obracać prawie swobodnie, czyli przyjmować dowolną orientację. To zamrożenie spinów dla temperatur niższych, począwszy od T_c , to właśnie tajemnicze *spontaniczne złamanie ich symetrii* względem ich dowolnych obrotów, czyli przyjmowanie ściśle określonej orientacji w ich własnej przestrzeni.

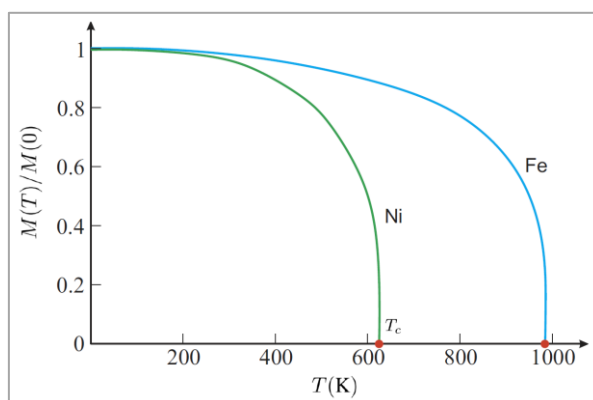


Rys. 1. Ciepło właściwe dla ciekłego ^4He w funkcji różnicy temperatury (względem temperatury krytycznej $T_c \equiv T_\lambda$) przy przejściu do nadciekłości (fazy bez lepkości), na trzech skalach: kelwinowej, milikelwinowej i mikrokelwinowej. Krzywa ciągła to z dobrym przybliżeniem krzywa logarytmiczna $C \sim \ln|T - T_\lambda|$. To przejście fazowe nosi nazwę przejścia λ ze względu na kształt tych krzywych (zob. J. Spalek, *Postępy Fizyki*, t. 63, nr 1, s. 10 (2010) i prace tam cytowane)



Rys. 2. Podstawowe dwa typy uporządkowania spinów dla $T < T_c$: ferromagnetyczne (lewy rysunek) i antyferromagnetyczne (po prawej stronie) na dwuwymiarowej sieci kwadratowej

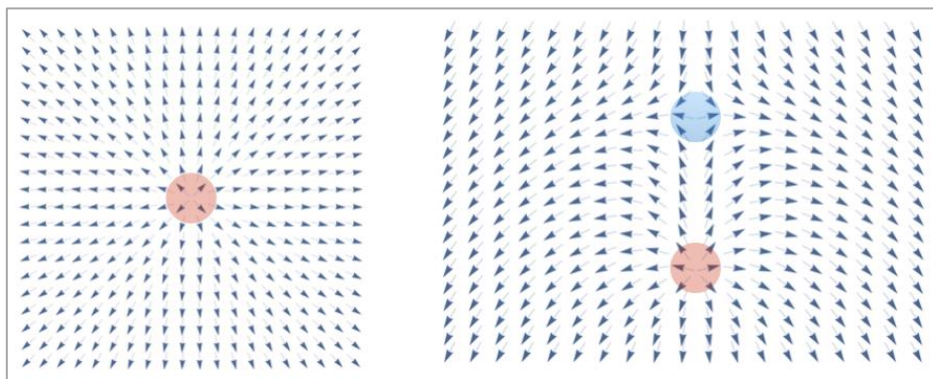
Podstawową koncepcją teoretyczną opisu przejść fazowych jest pojęcie parametru uporządkowania wprowadzone przez L.D. Landaua, rozwijane szczególnie w latach 60. i 70. XX wieku, w wyniku których powstała teoria zjawisk krytycznych (osobliwości przy przejściach fazowych), które to osiągnięcie zostało ukoronowane Nagrodami Nobla dla Landaua (1962) oraz Kennetha G. Wilsona (1982). W wyniku tych i wielu prac innych autorów powstała kompletna teoria klasycznych przejść fazowych ciągłych (dla których $T_c > 0$) w układach z uporządkowaniem dalekiego zasięgu (por. rys. 2). Typowe przykłady zależności jednorodnego przestrzennie parametru uporządkowania od temperatury dla metali magnetycznych Fe oraz Ni pokazano na rys. 3. Do klasy tych przejść fazowych należy bardzo obszerny zbiór materiałów magnetycznych, ferroelektrycznych, nadprzewodzących, nadciekłych i innych.



Rys. 3. Zależność względnego momentu magnetycznego od temperatury dla metalicznych ferromagnetyków niklu (Ni) i żelaza (Fe). Jest to przykład tzw. klasycznego ciągłego przejścia fazowego, bo parametr porządku zmienia się od jedności dla $T = 0$ do zera dla $T = T_c$ w sposób ciągły i z temperaturą T_c względnie wysoką (obszar praktycznie klasyczny)

2. Uporządkowanie topologiczne: stany spontaniczne z wirami i ich parami

Przedmiotem zainteresowania Thoulessa oraz Kosterlitz, począwszy od zasadniczej pracy opublikowanej w 1973 roku w brytyjskim czasopiśmie specjalistycznym *Journal of Physics: Solid State Physics*, była kwestia uporządkowania spinowego w przypadku układów (sieci) dwuwymiarowych. Dlaczego? Wcześniej N.D. Mermin i H. Wagner (1966) wykazali, że uporządkowanie długozasięgowego typu pokazanego na rys. 2 nie może w tym przypadku mieć miejsca. Jednakże H.E. Stanley i T.A. Kaplan pokazali, że mimo tego braku długozasięgowego uporządkowania taki układ spinów wykazuje osobliwości podatności magnetycznej (tj. łatwości polaryzowania się przy przyłożeniu nawet bardzo małego pola zewnętrznego). Kosterlitz i Thouless rozwiązali ten problem wprowadzając uporządkowanie w postaci związanych par wirów (par worteksów). Pojedynczy wir oraz parę dwóch związanych wirów przedstawiono na rys. 4. Zauważmy, że strzałki oznaczają orientację spinów na płaszczyźnie. Jest to ewidentny przykład uporządkowania niejednorodnego z osobliwością w środku wiru (spin w środku ma nieokreśloną orientację).



Rys. 4. Konfiguracja spinów na płaszczyźnie dla pojedynczego worteksu (lewa część) i pary worteks-antyworteks (prawa część). Zaznaczone koła oznaczają symbolicznie tzw. obszar jądra worteksu. Ładunki topologiczne tych obiektów wynoszą odpowiednio $n = 1$ oraz $n \equiv n_1 + n_2 = 0$

Najbardziej zadziwiającą cechą stanów (faz) z worteksami jest to, że dla pojedynczego worteksu rozkład pola elektrycznego na płaszczyźnie jest analogiczny do rozkładu statycznego pola elektrycznego wokół ładunku umieszczonego w punkcie środkowym wiru. Jaki zatem jest to ładunek w przypadku takiego ułożenia spinów? Jest to tzw. *ładunek topologiczny* i jego wartość jest skwantowana, podobnie jak dowolnego ładunku elektrycznego (równego wielokrotności ładunku elektronu czy protonu), i równa w tym przypadku liczbie n całkowitych obrotów (o 360°) spinów przy zakreślaniu okręgu wokół środka. Dla normalnego uporządkowania długozasięgowego $n = 0$, natomiast dla topo-

logicznego $n = \pm 1, \pm 2, \dots$. Wartość tego ładunku jest niezależna od wyboru kształtu konturu, byleby obejmował on punkt osobliwości. Co więcej, podobna sytuacja ma miejsce dla par worteksów. Jeśli taki ładunek topologiczny wewnątrz konturów obejmujących oba wiry wynosi zero, to mówimy, że mamy do czynienia ze związaną parą worteks-antyworteks. I właśnie układ takich par wypełniających płaszczyznę z charakterystyczną odległością ξ , zwaną długością korelacji, jest stanem uporządkowania topologicznego poniżej temperatury krytycznej $T_c = T_{KT}$, zwanej temperaturą Kosterlitz-Thoulessa. W pobliżu T_{KT} wielkość ξ wykazuje zachowanie osobliwe.

Ta piękna historia zawiera też jeden wątek smutny. Dotyczy ona radzieckiego fizyka Vadima Berezinskiego (1935–1982) (fot. 2), który napisał pionierskie prace dwa lata przed pracami Kosterlitz i Thoulessa, ale zmarł przedwcześnie. Zwykle upływa co najmniej 30–40 lat zanim prace zostaną docenione, a ich autorzy uhonorowani tą zaszczytną Nagrodą. Pocieszeniem jest fakt, iż to przejście fazowe nosi obecnie nazwę przejścia Berezinskiego-Kosterlitz-Thoulessa (BKT). Nie można się oprzeć wrażeniu, że V. Berezinskii byłby tutaj właściwym laureatem tej Nagrody, ale to już zupełnie inna sprawa.



Fot. 2. Vadim Berezinskii (1935–1980) – pracował w Instytucie Fizyki Teoretycznej im. Landaua w Akademii Nauk ZSRR

Uwaga druga: uważny czytelnik dostrzeże, że pominąłem tutaj wkład Haldane'a, bowiem w dużej mierze dotyczy on nieco innych zagadnień, w tym własności układów spinowych jednowymiarowych, np. występowania tzw. *przerwy spinowej*. Haldane ma także duże zasługi przy wprowadzeniu uogólnionych statystyk kwantowych. Są to zagadnienia bardzo ważne, ale zbyt specjalistyczne, żeby je przedstawiać w ramach tego eseju.

3. Co dalej?

Stany uporządkowane topologicznie są uporządkowaniem wyższego rzędu, przejście BKT jest uważane za przejście nieskończonego rzędu. Bowiem, upo-

rzędkowanie to nie jest takie samo jak w przypadku spontanicznego złamania symetrii globalnej. I to jest następna cecha oryginalna w tej tematyce. Jednakże zachowana została koncepcja parametru porządku w formie orientacji polaryzacji spinowej w danym punkcie przestrzeni (płaszczyzny w tym przypadku).

Prace Kosterlitz i Thoulessa zostały pięknie potwierdzone doświadczalnie przez D.J. Bishopa i J.D. Reppy'ego w 1978 roku, którzy badali zachowanie monowarstwy ^4He na powierzchni ciała stałego przy różnych temperaturach i gęstościach helu. Co więcej, bardzo ciekawe zastosowania koncepcji Haldane'a (1988) zaproponowano do konstrukcji sztucznych spinów topologicznych materii (Bloch 2014, Esslinger 2014). Tak więc, koncepcje regularnego uporządkowania sieci spinowych zostały uogólnione na przypadek uporządkowania niejednorodnego (topologicznego), a to z kolei jest badane pod kątem wytworzenia nowych stanów nieobserwowanych w Przyrodzie. Tempora mutantur!

Należy też nadmienić, iż obecnie intensywnie badane są tzw. kwantowe przejścia fazowe, dla których $T_c \equiv 0$. Występują wtedy osobliwości mierzalnych wielkości fizycznych przy $T \rightarrow 0$, czyli natura stanu podstawowego układu wielu cząstek kwantowych jest w takim przypadku znacznie bardziej złożona, aniżeli wyobrażali to sobie twórcy mechaniki kwantowej prawie 100 lat temu. No i dobrze, jest co robić.

P.S. Czytelnikowi zainteresowanemu tą tematyką (i literaturą oryginalną) można polecić stronę internetową Fundacji Nobla:

www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2016/advanced-physicsprize2016.pdf