

Topološka snov

Nobelova nagrada za fiziko za leto 2016

Aleš Mohorič

Snov je povsod okoli nas, je zrak, ki ga dihamo, in je voda, ki jo pijemo. Različne snovi ločimo med seboj po njihovih lastnostih. Lahko so trdne, tekoče, goste ali redke. Čim bolj podrobno raziskujemo naravo, tem več lastnosti opazimo. Tako po električnih lastnostih snovi delimo na prevodnike, polprevodnike in izolatorje. Snov raziskujemo z eksperimenti in opišemo s teoretičnimi modeli. Ti modeli so osnova za nadaljnje raziskave, ki lahko pripeljejo do novih, neslutelih odkritij. **Prejemniki Nobelove nagrade za fiziko za leto 2016** so vpeljali teorijo, ki opiše nenavadne lastnosti topoloških snovi.

V zgodnjih sedemdesetih letih dvajsetega stoletja sta John Michael Kosterlitz in David Thouless opisala fazni prehod v dvodimenzionalnih sistemih s teorijo vrtincev.

Nobelova nagrada za fiziko za leto 2016 je bila podeljena za teoretični opis topoloških faznih prehodov in topološke faze snovi.

Vrtinec je topološki defekt. Pri tem prehodu se simetrija sistema ne spremeni, spremeni se topološki razred sistema.

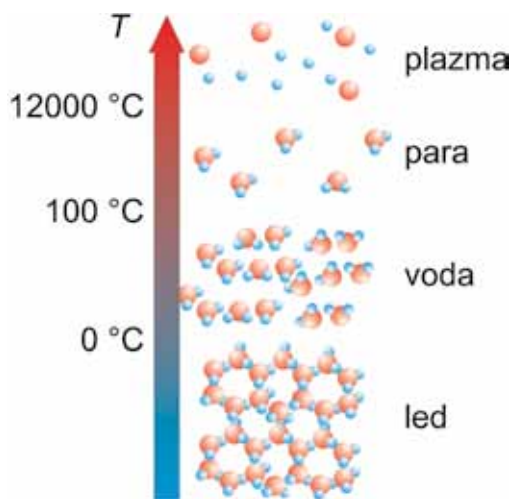
Desetletje kasneje je Frederick Duncan Michael Haldane s teorijo, ki sta jo razvila Kosterlitz in Thouless, opisal enodimenzionalno verigo spinov. Ob tem času je Thouless z novo teorijo pojasnil tudi kvantizacijo prevodnosti pri kvantnem Hallovem pojavu v dvodimenzionalnih sistemih.

Fazni prehod je pogosto povezan s spremembo urejenosti gradnikov. V snovi se vzpostavi red, ker med seboj tekmuje za



Prejemniki Nobelove nagrade za fiziko 2016:

David Thouless, Duncan Haldane in Michael Kosterlitz. Vsi so bili rojeni v Združenem kraljestvu in trenutno delujejo v Združenih državah Amerike. Thouless je bil rojen leta 1934, doktoriral je na Cornellu (ZDA), zdaj pa raziskuje na Univerzi v Washingtonu (ZDA). Haldane je bil rojen leta 1951 in je doktoriral na univerzi v Cambridgeu. Zdaj raziskuje na Univerzi Princeton (ZDA). Kosterlitz je bil rojen leta 1943, doktoriral je v Oxfordu in raziskuje na Univerzi Brown (ZDA).



Fazni prehod

Snov se lahko nahaja v različnih fazah. Fazni prehod povzroči sprememba temperature ali kake druge termodinamične spremenljivke.

prevlado entropija in termična energija. Termično gibanje teži k porušitvi urejenega stanja in to se vedno zgodi pri dovolj visokih temperaturah. Po drugi strani pa je pri dovolj nizki temperaturi ravnovesno stanje urejeno. Fazni prehod opiše teorija faznih prehodov, ki upošteva spreminjanje ustreznega ureditvenega parametra.

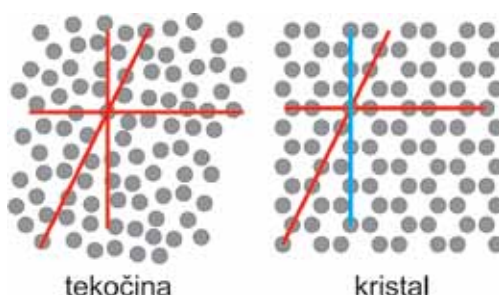
Že stoletje je znano, da v dvodimenzionalnih ali enodimenzionalnih sistemih (tanke plasti in verige) termično gibanje preprečuje nastanek urejene strukture. To velja tako za kristalne strukture kot za **superprevodne** in supertekoče plasti ter magnetne strukture, v katerih se urejajo spini.

Thouless je postal pozoren na pomanjkljivost teorije faznih prehodov, ko je leta 1969 na obisku Bellovih laboratorijev izvedel za

Superprevodnost

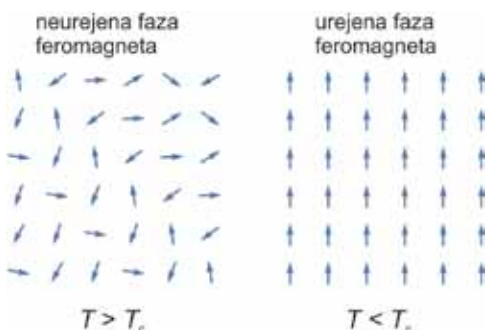
Upornost superprevodnika pade na nič pod kritično temperaturo. Supertekočina pod kritično temperaturo teče, kot da bi bila viskoznost enaka nič. Pojava pojasnimo v okviru teoretičnih modelov kvantne mehanike.

Opis slike: Supertekoči helij teče po stenah posodice navzgor in se pretoči preko roba, ki je nad gladino.



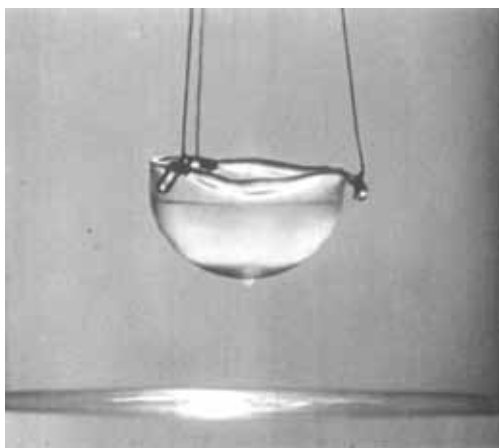
Zlom simetrije

Tekočina je izotropna, v povprečju ima enake lastnosti v vseh smereh. Kristal je zaradi svojih pravilnih oblik videti bolj simetričen, a njegova simetrija je manjša. Gradnike kristala vidimo enako postavljene le, kadar gledamo iz določenih smeri. Fazni prehod tekočine v trdnino poteka z zlomom simetrije.



Feromagnet

Feromagnetna snov se namagnetni, ko se ohladi pod kritično temperaturo. Fazni prehod je povezan z zlomom simetrije: neurejeni spini se uredijo.





Topologija

S topološkega stališča sta krofa na sliki različna. Topologija je matematična veja, ki se ukvarja z značilnostmi množice, ki obranjajo vsako obrnljivo, v obe smeri zvezno transformacijo te množice. Če telo lahko iz ene oblike brez trganja pregnetemo v drugo, sta telesi topološko enaki.

težave pri opisu faznih prehodov, ki so jih opazovali v nekaterih enodimenzionalnih magnetih. Fazni prehod se v verigi spinov zgodi le v primeru, ko med seboj sodelujejo tudi oddaljeni spini. V primeru, da medsebojni vpliv čutijo le sosednji spini, pa do faznega prehoda ne pride. Teh opazovanj ni mogla opisati nobena od dotedanjih teorij. Težave so bile tudi s teoretičnim opisom nastanka vrtincev, ki so jih opazili v tanki plasti supertekočega helija.

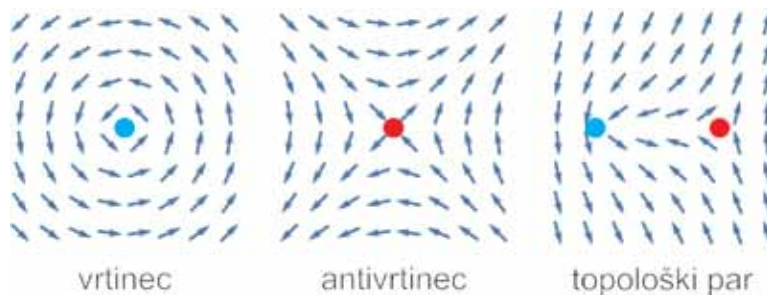
Takratne teorije so obravnavale fazne prehode kot spremembo v urejenosti gradnikov in simetrije. Fazni prehod iz neurejenega v urejeno stanje se zgodi zaradi spontanega **zloma simetrije**. Stanje snovi opiše od temperature, tlaka ali drugih termodinamičnih količin odvisna magnetizacija ali ustrezeni parameter, s katerim opišemo urejenost sistema. Čeprav je bila ta teoretična slika dokaj jasna in uveljavljena, so nekateri poskusi kazali, da je v tanki plasti helija mogoč prehod v supertekočo fazo. Na to so kazale tudi računalniške simulacije magnetnih sistemov.

Ti rezultati so odpirali vprašanje: kako je fazni prehod mogoč, če v snovi ni zloma

simetrije? Ključ do odgovora sta leta 1972 našla Kosterlitz in Thouless. Pokazala sta, da v snovi lahko nastane tudi urejena **topološka** struktura.

V dvodimenzionalnih sistemih nastanejo **vrtinci**, ampak to niso taki vrtinci, kot jih lahko opazimo na vodni gladini. Pojasnimo vrtinec na primeru **feromagneteta** – to je mreža vzporednih spinov. Po ravnini opravimo krožno pot. Vsi spini, ki jih srečamo na poti, kažejo v isto smer. V tem primeru pot ne obide vrtinca. V primeru, da pot objame vrtinec, se smeri zaporednih spinov spreminjajo, ko gremo po krožnici. Med enim obhodom se spremenijo ravno za polni kot. Če krožnica obsega antivrtinec, se med enim obhodom smeri spinov tudi spremeni za polni kot, vendar v nasprotni smeri od smeri obhoda.

Sistem spinov z vrtincem je topološko različen od sistema urejenih spinov. Sistem s parom vrtinec-antivrtinec pa je sistemu urejenih spinov topološko enak. Termično gibanje preprečuje nastanek dvodimenzionalnega sistema urejenih spinov, ne preprečuje pa nastanka strukture med seboj povezanih vrtincev in antivrtincev. Pri temperaturi, višji od kritične, se ti pari razdrejo in pride do



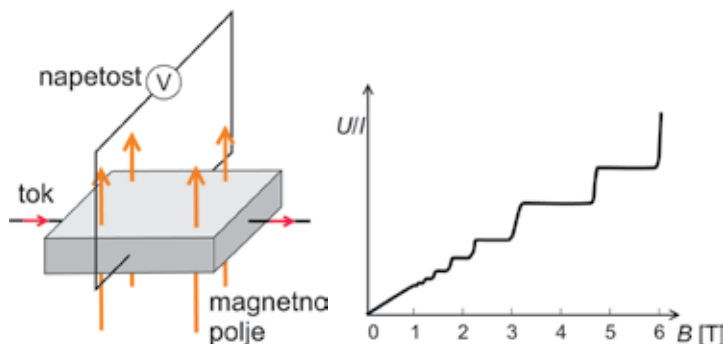
Vrtinci

Spini se lahko uredijo v obliki vrtinca ali antivrtinca. V topološki snovi nastopajo ti topološki defekti v parih. Par je povezan pri temperaturi, nižji od kritične, pri višji pa razpade.

topološkega faznega prehoda. Tak pristop zadovoljivo opiše taljenje dvodimenzionalnih kristalov, tankoplastne magnete, tanke plasti supertekočin in superprevodnikov.

Nekoliko težje pokažemo, da ta pristop deluje tudi za enodimenzionalne verige spinov. Enodimenzionalno verigo dopolnimo v dvodimenzionalni sistem tako, da druga os predstavlja čas in vrtinci pomenijo prehajanje med dvema različnima topološkima stanjema. To je leta 1981 naredil D. Haldane, ki je ugotovil, da se pri verigi celih spinov prehod zgodi, pri verigi polovičnih spinov pa ne. To napoved so kmalu po objavi eksperimentalno potrdili.

Teorija topoloških faznih prehodov opiše tudi kvantizacijo prevodnosti pri kvantnem **Hallovem pojavu**. Pri Hallovem pojavu teče



Hallov pojav

Pri Hallovem pojavu merimo napetost med nasprotnima robovoma traku, skozi katerega teče električni tok in stoji v magnetnem polju. Kvantni Hallov pojav opazimo pri zelo tankem traku in nizki temperaturi. Napetost se spreminja v skokih, ko povečujemo gostoto magnetnega polja.

električni tok v prevodnem vodniku, prečno nanj pa izmerimo med stranicama vodnika električno napetost. Napetost povzroči magnetno polje s silnicami, pravokotnimi na tok in stranico, na kateri merimo napetost. Kvantni Hallov pojav opazimo v zelo tankem vodniku pri nizki temperaturi. Leta 1980 ga je odkril nemški fizik Klaus von

Klitzing, ki je zanj dobil Nobelovo nagrado leta 1985. Raziskoval je zelo tanko prevodno plast med dvema polprevodnikoma, ohlajeno skoraj na absolutno ničlo in postavljeno v močno magnetno polje. Kvociient toka in napetosti je Hallova prevodnost. Meritve prevodnosti so vedno pokazale neko diskretno vrednost in te vrednosti so se med seboj razlikovale za natančno cel večkratnik. V fiziki je tak rezultat običajno znak kvantizacije. Merjenja so dala ponovljive rezultate, čeprav so bili magnetno polje, temperatura in gostota nečistoč v polprevodniku različni. Kadar se je gostota magnetnega polja dovolj spremenila, se je skokovito spremenila tudi prevodnost plasti. Najprej na dvojno, nato na trojno vrednost in tako dalje. Stara teorija električne prevodnosti tega pojava ni mogla pojasniti. Pojav je Thouless pojasnil

s svojo teorijo topoloških prehodov leta 1982. Kvantizirane spremembe prevodnosti so posledica prehajanja med različnimi topološkimi stanji. Podobna razlaga opiše tudi topološke izolatorje. To so neprevodne snovi s prevodno površino.

Raziskave zdaj tečejo v smeri razvoja topoloških izolatorjev, superprevodnikov in topoloških kovin. Te snovi utegnejo izboljšati elektroniko in omogočiti delovanje kvantnih računalnikov. Topološka stanja so dokaj stabilna in ne razpadajo

zaradi motenj, zato topološke izolatorje raziskujejo kot možne elemente kvantnih računalnikov.