

Supravodivosť

Elektrický prúd v kovovom drôte si môžeme predstaviť ako prúd vody v rieke. Skutočná voda zakaždým tečie iba dolu kopcom, ale niektoré kovy pri nízkych teplotách možno prirovnať k riekam, v ktorých voda potečie aj na rovine.

Naša každodenná skúsenosť nám hovorí, že pohyb bez trenia neexistuje. Napríklad po zaradení voľnobehu na vodorovnej ceste naše auto skôr či neskôr zastane, nech je akokoľvek rýchlo rozbehnuté, pretože musí prekonať odpor vzduchu. Energia auta sa pritom samozrejme nestráca, ale iba odovzdáva molekulám vzduchu, ktoré autu stoja v ceste. Chaotický pohyb molekúl vzduchu sa pritom navonok prejaví tak, že vzduch sa zahreje. Energia mechanického pohybu sa teda trením mení na tepelnú.

Aj pri tečení elektrického prúdu v drôte dochádza k treniu, tentokrát sa však netrie auto o vzduch, ale elektrický prúd, čiže usmernený tok elektrónov, sa trie o stojaci drôt. Zhruba 5 percent elektrickej energie vyrobenej v elektrárňach sa týmto spôsobom stratí v elektrickom vedení. Existuje spôsob, ako sa týmto stratám vyhnúť a trenie eliminovať?

Jednou z očividných možností, ako znížiť trenie, je zriediť prostredie, cez ktoré sa teleso pohybuje. Napríklad planéta Zem sa hýbe cez takmer dokonalé vákuum, a preto pri skúmaní jej pohybu môžeme trenie obvykle zanedbať. Keby to nebola pravda, dĺžka po sebe nasledujúcich rokov by nemohla byť s vysokou presnosťou stále rovnaká. Ako však možno odstrániť trenie elektrického prúdu o drôt?

Miera trenia elektrónov o drôt sa nazýva elektrický odpor. Je dávno známe, že elektrický odpor kovov závisí predovšetkým od čistoty materiálu a od teploty. Veľkou neznámou na začiatku 20. storočia však bolo, aký bude odpor veľmi čistých kovov pri extrémne nízkych teplotách blízky k absolútnej nule teploty. K dispozícii boli dve teoretické predpovede. Podľa jednej z nich mal odpor dokonale čistého kovu pri znižovaní teploty stále klesať a pri absolútnej nule teploty úplne vymiznúť, pretože vtedy sa elektróny nemajú o čo trieť. Podľa druhej teórie mal odpor pri veľmi nízkych teplotách naopak začať rásť nad všetky medze, pretože záporne nabité elektróny by sa mali naviazať na kladne nabité ióny a zmrznúť pri nich.

Supravodivosť

Tento spor motivoval Kammerlingha Onnesa na univerzite v holandskom Leidene, aby skúmal odpor rôznych kovov pri veľmi nízkych teplotách. Výsledky pre zlato boli v zhode s hypotézou, že odpor dokonale čistých kovov sa pri približovaní k absolútnej nule teploty znižuje na nulovú hodnotu. Aby ďalej podporil túto hypotézu, Kammerlingh Onnes sa rozhodol zmerať odpor aj pre ortuť, pretože z nej možno destiláciou vyrobiť ešte čistejší materiál, než zlato. Takmer presne pred 100 rokmi, 8. apríla 1911, pritom pozoroval správanie, ktoré bolo v spore s obidvomi teoretickými predpoveďami. Ukázalo sa totiž, že pri veľmi nízkej teplote asi 4 stupne nad absolútnou nulou, čo je zhruba -269°C , sa odpor ortuti skokom zmení z konečne veľkej hodnoty na nemeateľne malú hodnotu. To však znamená, že bol objavený materiál s nulovým trením! Ak v prstenci z takéhoto materiálu rozbehneme elektrický prúd, tento prúd v ňom potečie stále.

Stav s nulovým elektrickým odporom nazývame supravodivým. O tom, či je ortuť supravodivá, pritom rozhoduje iba teplota: ak supravodivú ortuť naspäť vyhrejeme nad tzv. kritickú teplotu -269°C , jej odpor sa skokom naspäť zmení na konečnú hodnotu, aby pri

nasledujúcom schladení pod kritickú teplotu zase vymizol. Ďalší výskum ukázal, že takmer všetky kovy sú pri dostatočne nízkych teplotách supravodivé, a to dokonca aj v prípadoch, kedy obsahujú veľké množstvo nečistôt, na ktoré by elektróny mohli narážať. Absencia trenia v supravodičoch musí teda mať iný (a omnoho zaujímavejší) dôvod ako bezstratový pohyb Zeme cez medziplanetárny priestor .

Podľa súčasných predstáv sa supravodivý kov líši od normálneho kovu podobne, ako sa ľad líši od vodnej pary: hoci ľad aj para obsahujú tie isté molekuly, ich vlastnosti sú vďaka rozdielnemu usporiadaniu molekúl v oboch skupenstvách (fázach) veľmi odlišné. Prechod z normálnej do supravodivej fázy je teda fázovým prechodom a obidve fázy sa líšia iba usporiadaním elektrónov.

Nové usporiadanie elektrónov, ktoré vzniká v supravodivom stave, si možno predstaviť nasledovne. V prvom kroku vytvoria dvojice elektrónov pri schladení kovu pod kritickú teplotu viazané páry. Pritom rozhodne nie je očividné, že takéto páry môžu vznikáť, keď rovnako nabité elektróny by sa mali elektricky odpudzovať. Ak však vezmeme do úvahy, že skúmaná dvojica elektrónov nežije osamotene vo vákuu, ale v zložitom médiu tvorenom ostatnými elektrónmi a tiež iónmi, potom sa dá ukázať, že výsledná sila medzi elektrónmi môže byť príťažlivá. Samotná prítomnosť elektrónových párov však na vysvetlenie supravodivosti nestačí.

Druhý krok je dôsledkom zákonov kvantovej mechaniky a v bežnom klasickom svete analogické javy neexistujú. Jeho podstatou je, že pri znižovaní teploty sa čoraz väčšia časť elektrónových párov začne pohybovať rovnakým spôsobom ako ostatné páry. Väčšinové páry teda vytvárajú niečo ako klub, ktorý sa obvykle nazýva kondenzátom. Percentuálny podiel párov, ktoré tvoria kondenzát, pri znižovaní teploty rastie a pri absolútnej nule teploty sa v kondenzáte nachádzajú všetky páry.

Prítomnosť kondenzátu je kľúčom k pochopeniu večného prúdu v supravodivom prstenci. V prstenci s elektrickým prúdom totiž existuje kondenzát, ktorý sa pohybuje tým istým smerom, ako prúd. Prúd nesený kondenzátom by sa hypoteticky mohol znižovať, keby v dôsledku kolízií s časticami okolia mohli elektrónové páry opúšťať klub. Dá sa však ukázať, že pri takejto zrážke by supravodič musel odoberať teplo z okolia. Zo všeobecných úvah o vzniku tepla na druhej strane vyplýva, že pri akomkoľvek prúdení častíc sa teplo naopak musí uvoľňovať do okolitého prostredia, a preto k takejto kolízii nemôže dôjsť. Vďaka tomu supravodivý prúd môže tiecť v uzavretom prstenci prakticky nekonečne dlho. Jediný spôsob, ktorým by prúd mohol zaniknúť, je naraz zmeniť pohyb veľkého počtu elektrónových párov tvoriacich kondenzát – to je však obvykle extrémne nepravdepodobné.

Aplikácie

Supravodiče sa v praxi používajú predovšetkým pri medicínskom zobrazovaní pomocou magnetickej rezonancie. Základným predpokladom použitia tejto techniky je totiž existencia dostatočne silného magnetického poľa, ktoré má presne predpísanú hodnotu v pomerne veľkých objemoch porovnateľných s ľudským telom a navyše je stabilné. Polia potrebnej veľkosti je možné vytvoriť iba pomocou tzv. elektromagnetov, čiže cievok, cez ktoré púšťame elektrický prúd. Vnútri cievky pritom vzniká magnetické pole, ktoré je tým silnejšie, čím väčší prúd cez ňu tečie. Hlavným problémom je, že na udržanie potrebnej veľkosti elektrického prúdu v cievke potrebujeme neustále dodávať energiu, a preto je prevádzka elektromagnetov drahá.

Už Kammelingh Onnes si však uvedomil, že ak cievku vyrobíme zo supravodivého materiálu, ktorý schladíme pod kritickú teplotu, potom stačí na začiatku prúd rozbehnúť a on už ďalej potečie bez nutnosti dodávať energiu. Na vytvorenie silného magnetického poľa v takomto prípade potrebujeme dodávať energiu iba na chladenie cievky pod kritickú teplotu, ale táto položka nie je vysoká.

Pri realizácii tohto programu sa však vyskytli nečakané prekážky: ukázalo sa totiž, že nielen zvyšovanie teploty, ale aj vkladanie supravodičov do silného magnetického poľa narúša supravodivosť. Zdalo sa teda, že supravodivé magnety nemožno vyrobiť, pretože magnetické pole, ktoré má magnet vyrábať, by rozrušilo supravodivosť drôtov. Rozhodujúcim krokom k praktickému uplatneniu supravodičov bol objav supravodivosti v skupine zliatin obsahujúcich niób, ktoré jednak majú vyššie kritické teploty ako čisté kovy, ale najmä zostávajú supravodivé aj v prakticky zaujímavých magnetických poliach.

Okrem medicínskych aplikácií sa supravodivé magnety bežne používajú na vedecké účely, pričom najznámejším príkladom je ich masívne nasadenie v urýchľovačoch elementárnych častíc, napríklad vo švajčiarskom CERNe. Možnosti supravodivých technológií však boli demonštrované aj v iných oblastiach, napríklad na Long Islande v New Yorku je od apríla 2008 súčasťou elektrickej rozvodnej siete asi 600 metrov dlhý supravodivý kábel.

Konečným cieľom výskumu supravodivosti je vyvinúť materiál, ktorého kritická teplota by bola povedzme aspoň 30°C. Drôty z takéhoto materiálu by totiž nebolo potrebné chladiť, aby sa stali supravodivými, čo by umožnilo ich široké uplatnenie v praxi. V súčasnosti má najvyššia dosiahnutá kritická teplota hodnotu zhruba -138°C. Táto hodnota je už zhruba na polceste medzi kritickou teplotou ortuti a izbovou teplotou. Zatiaľ nie je jasné, či môžu existovať sily, ktoré sú schopné udržať elektrónový pár pohromade aj pri vyšších teplotách. S istotou však vieme, že ak sa klub podarí vytvoriť, jeho členom kolízie nebudú hroziť.