

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Joanna Rose

Nobelova cena za fyziku v roce 2016 - podivné jevy v plochém světě

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 62 (2017), No. 1, 1–6

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/146716>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2017

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

Nobelova cena za fyziku v roce 2016 — podivné jevy v plochem světě

Joanna Rose

Abstrakt. Laureáti Nobelovy ceny za fyziku v roce 2016 otevřeli dveře do neznámého světa, v němž hmota existuje v podivných stavech. Nobelova cena za fyziku byla udělena z jedné poloviny Davidu J. Thoulessovi z Washingtonské univerzity v Seattlu a z druhé poloviny společně F. Duncanovi M. Haldanovi z univerzity v Princetonu a J. Michaelovi Kosterlitzovi z Brownovy univerzity v Providence. Jejich objevy představují významný průlom do teoretického chápání tajemství hmoty a do vývoje nových materiálů.

David Thouless, Duncan Haldane a Michael Kosterlitz (obr. 1) využili pokročilých matematických metod k vysvětlení podivných jevů v neobvyklých fázích (či stavech) hmoty, jakými jsou supravodivost, supratekutost nebo tenké magnetické vrstvy. Kosterlitz a Thouless studovali jevy, které vznikají v plochem světě — na površích nebo uvnitř nesmírně tenkých vrstev, které mohou být považovány za dvourozměrné. Haldane se také zabýval hmotou ve formě vláken tak tenkých, že mohou být považována za jednorozměrná.

Fyzika v plochem světě je velice odlišná od té, kterou známe ze světa kolem nás. Ačkoli je tenká vrstva hmoty složena z miliónů atomů a ačkoli se vlastnosti každého atomu dají vysvětlit zákony kvantové fyziky, tyto atomy vykazují zcela jiné vlastnosti, pokud se spojí dohromady. V plochem světě jsou stále objevovány nové kolektivní jevy a fyzika kondenzovaného stavu je jednou z nejživějších oblastí fyziky.



Obr. 1. David J. Thouless, F. Duncan M. Haldane, J. Michael Kosterlitz (© The Royal Swedish Academy of Sciences, photo Markus Marcetic)

© Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences. Z anglického originálu *Popular Science Background: Strange phenomena in matter's flatlands* přeložil MILOŠ ROTTER. Publikováno se svolením The Royal Swedish Academy of Sciences.

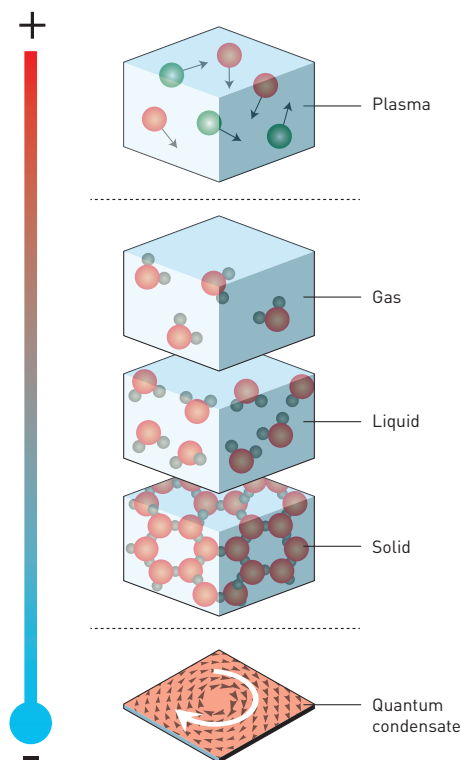


Illustration: © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Obr. 2. Fáze hmoty. Nejobvyklejší fáze hmoty jsou plynná, kapalná a pevná fáze. Avšak v extrémně vysokých nebo nízkých teplotách se může hmota nacházet i v jiných exotičtějším fázích.

Laureáti ve své práci použili znalosti z topologie, které byly pro jejich objevy rozhodující. Topologie je odvětví matematiky popisující vlastnosti, které se mění skokově. Využitím moderní topologie dosáhli laureáti překvapivých výsledků, které otevřely nová pole výzkumu a vedly k vytváření nových a důležitých konceptů v řadě oblastí fyziky.

Kvantová fyzika se při nízkých teplotách stává viditelnou

Při velmi nízkých teplotách se veškerá hmota řídí zákony kvantové fyziky. Plyny, kapaliny a pevné látky jsou fáze hmoty, v nichž jsou kvantové jevy často potlačeny chaotickým pohybem atomů. Avšak v oblasti extrémního chladu v blízkosti absolutní nuly ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$) přechází hmota do nových podivných fází a chová se neobvyklým způsobem. Kvantová fyzika, která obvykle působí v mikrosvětě, se náhle stává viditelnou (obr. 2).

Běžné fáze hmoty přecházejí jedna v druhou při změnách teploty. K takové fázové přeměně dochází například v ledu, jenž je složen z dobře uspořádaných krystalů. Při zahřívání led taje a mění se ve vodu, chaotičtější uspořádanou fázi hmoty. U hmoty v plochem světě ovšem nacházíme i fáze, které dosud nebyly zcela prozkoumány.

Při nízkých teplotách mohou nastávat podivné jevy. Může například náhle vymizet odpor, který působí na všechny pohybující se částice. K tomu dochází třeba v supravodiči, v němž teče elektrický proud bez odporu, nebo v supratekuté kapalině, v níž víry rotují bez útlumu.

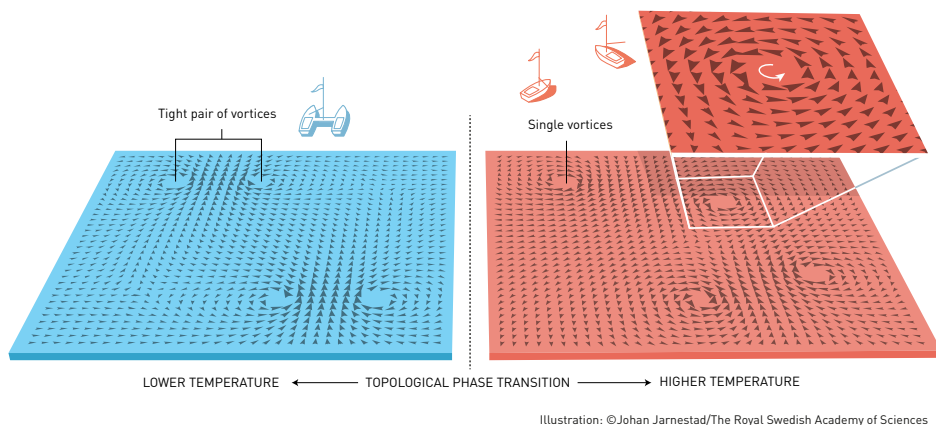
Prvním, kdo se již v třicátých letech dvacátého století systematicky zabýval supratekutostí, byl ruský fyzik Petr Kapica. Ochladil helium 4, které se nachází ve vzduchu, na teplotu $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zjistil, že helium teče vzhůru po stěně nádoby. Jinými slovy, chová se jako supratekutá kapalina, jejíž viskozita zcela vymizela. Kapica získal v roce 1978 Nobelovu cenu za fyziku a od té doby se v laboratořích podařilo demonstrovat řadu jiných příkladů supratekutého chování. Vedle supratekutosti helia jsou to jevy v tenkých vrstvách magnetických materiálů nebo v elektricky vodivých nanovláčkách — to je pouze několik příkladů z mnoha nových fází materiálů, které jsou nyní intenzivně studovány.

Řešení poskytly dvojice vírů

Vědci dlouho věřili tomu, že tepelné fluktuace zničí jakékoli uspořádání hmoty v plochem, dvourozměrném světě, dokonce i při absolutní nule. Neexistují-li uspořádané fáze, nemůže dojít k fázovým přechodům. Avšak na počátku sedmdesátých let se v Birminghamu ve Velké Británii sešli David Thouless a Michael Kosterlitz a zpochybnili dosavadní teorie. Pustili se společně do řešení problému fázových transformací v plochem prostoru (první ze zvědavosti a druhý z nevědomosti, jak sami prohlásili). Jejich spolupráce vyústila ve zcela nové chápání fázových transformací, které je považováno za jeden z nejvýznamnějších objevů fyziky kondenzovaných látek ve dvacátém století. Jedná se o teorii přechodů KT (Kosterlitzovy–Thoulessovy přechody) nebo též přechodů BKT, kde písmeno B označuje příspěvek Vadima Berezinského, již zesnulého moskevského teoretického fyzika, který přišel s podobnými myšlenkami.

Topologický fázový přechod není obvyklým přechodem, k jakému dochází mezi ledem a vodou. Zásadní roli v topologickém přechodu hrají malé víry v plochem materiálu. Při nízkých teplotách vytvářejí pevně svázané dvojice. Při vzrůstající teplotě dochází k fázové transformaci: víry se náhle od sebe oddělí a pohybují se materiálem samostatně (obr. 3).

Úžasné na této teorii je to, že může být použita na různé typy materiálů s nízkou dimenzí — transformace KT má univerzální charakter. Stala se užitečným nástrojem nejen ve světě kondenzovaných látek, ale také v jiných oblastech fyziky, jako např. v atomové fyzice nebo statistické mechanice. Teorie, jíž se řídí transformace KT, byla nejen rozvíjena svými tvůrci a dalšími vědci, ale byla též experimentálně potvrzena.



Obr. 3. Fázové přechody. Obvykle k nim dochází, když se jedna fáze látky mění v druhou, např. když taje led a mění se ve vodu. Kosterlitz a Thouless popsali topologické fázové přechody v tenkých vrstvách velmi chladných materiálů. Při nízkých teplotách víry vytvářejí dvojice, které se při teplotě fázového přechodu náhle rozdělí. Jedná se o jeden z nejvýznamnějších objevů ve fyzice kondenzovaných látek ve dvacátém století.

Tajemné kvantové skoky

Fyzikální experimenty vedly k objevu nových stavů hmoty, které vyžadovaly vysvětlení. V osmdesátých letech David Thouless spolu s Duncanem Haldanem zveřejnili novou přelomovou teoretickou práci, která zpochybnila dosavadní teorie, mj. i kvantově-mechanickou teorii elektrické vodivosti. Tato teorie byla původně vyvinuta ve třicátých letech a o několik desetiletí později byla považována za plně pochopenou.

Bylo tedy velkým překvapením, když v roce 1983 David Thouless dokázal, že předchozí teorie byla neúplná, a že při nízkých teplotách a v silných magnetických polích je třeba použít jiný typ teorie založený na topologickém přístupu. Zhruba v téže době došel Duncan Haldane k podobnému a podobně neočekávanému závěru při analýze řetízků magnetických atomů. Jejich práce posloužila jako nástroj v následujícím dramatickém vývoji teorie nových fází hmoty.

Tajemný jev, který David Thouless teoreticky popsal s využitím topologie, je kvantový Hallův jev. Byl objeven německým fyzikem Klausem von Klitzingem, který za něj získal Nobelovu cenu za fyziku v roce 1985. Klitzing studoval tenké vodivé vrstvy mezi dvěma polovodiči, v nichž ochladil elektrony na několik kelvinů nad absolutní nulou a působil na ně silným magnetickým polem.

Ve fyzice není neobvyklé, že při snížení teploty dochází k některým drastickým jevům. Mnohé materiály se například stávají magnetickými, poněvadž všechny malé atomové magnety v materiálu se náhle otočí stejným směrem a vznikne tak silné magnetické pole, které může být změřeno.

Avšak kvantový Hallův jev je k pochopení mnohem složitější. Ukazuje se, že elektrická vodivost ve vrstvách může nabývat pouze určitých hodnot, které jsou nesmírně přesné, což je jinak ve fyzice neobvyklé. Měření poskytují naprosto tytéž výsledky,

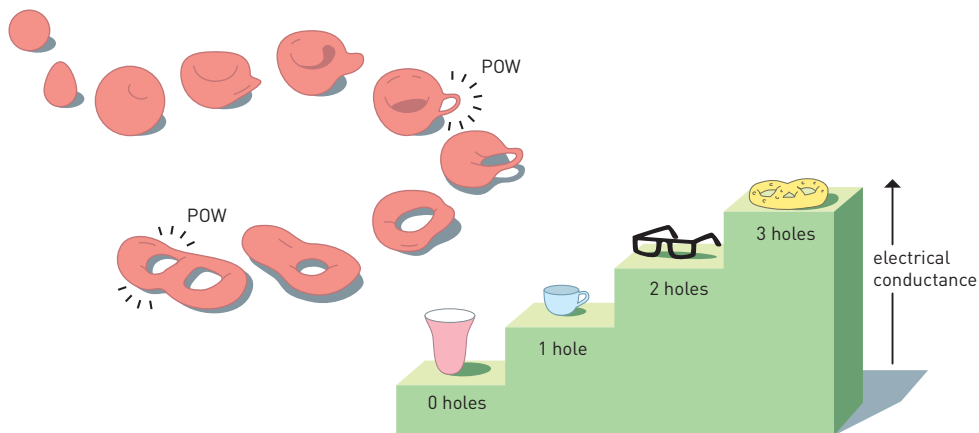


Illustration: ©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Obr. 4. Topologie. Toto odvětví matematiky se zabývá vlastnostmi, které se mění stupňovitě, jako počet otvorů na zobrazených objektech. Topologie představuje klíč k objevům, které učinili laureáti Nobelovy ceny. Vysvětluje, proč se elektrická vodivost uvnitř tenkých vrstev mění po celočíselných skocích.

i když se mění teplota a magnetické pole nebo množství příměsí v polovodiči. Změní-li se dostatečně magnetické pole, změní se rovněž vodivost vrstvy, avšak jen ve skocích. Při snižování intenzity magnetického pole vzroste elektrická vodivost přesně dvakrát, poté třikrát, pak čtyřikrát atd. Tyto celočíselné skoky nebylo možno vysvětlit na základě tehdejších znalostí, David Thouless však našel řešení této záhady pomocí topologie.

Řešení pomocí topologie

Topologie popisuje vlastnosti, které zůstávají neměnné, i když je objekt natažen, zkroucen nebo zdeformován. Topologicky náleží koule a miska do stejné kategorie, poněvadž kus jílu ve tvaru koule může být vytvarován do misky. Šálek na kávu s ouškem nebo bagel (donut či anuloid) s otvorem uprostřed patří do jiné kategorie, ale mohou být deformovány tak, že tvar jednoho přejde v druhý. Topologické objekty mohou obsahovat jeden otvor, dva či jiný celočíselný počet otvorů. To může být užitečné při popisu elektrické vodivosti zjištěné v kvantovém Hallově jevu, která se může měnit pouze po skocích, jež jsou přesné násobky celých čísel (obr. 4).

Při kvantovém Hallově jevu se elektrony pohybují relativně volně a vytvářejí něco, čemu se říká topologická kvantová kapalina. Podobně jako se často objevují nové vlastnosti, když se shromáždí mnoho částic, tak i elektrony v topologické kvantové kapalině vykazují překvapivé vlastnosti. Stejně jako nemůžeme zjistit, zda je v kávovém šálku otvor, zkoumáme-li jen jeho malou část, nelze ani určit, tvoří-li elektrony topologickou kvantovou kapalinu, pozorujeme-li pouze několik z nich. Vodivost však popisuje kolektivní pohyb elektronů a v důsledku topologie se mění po skocích, je kvantovaná. Další

zajímavostí topologické kvantové kapaliny jsou neobvyklé vlastnosti jejího okraje. Ty byly předpověděny nejprve teoreticky a později potvrzeny experimentálně.

Dalším milníkem se stal rok 1988, kdy Duncan Haldane zjistil, že topologické kvantové kapaliny podobné té, která vzniká při kvantovém Hallově jevu, se mohou vytvářet v tenkých polovodičových vrstvách i bez přítomnosti magnetického pole. Prohlásil, že nikdy nesnil o tom, že by se jeho teoretický model mohl potvrdit experimentálně. K tomu došlo v roce 2014 při experimentu, v němž byly použity atomy ochlazené téměř k absolutní nule.

Nové topologické materiály

Duncan Haldane ve své starší práci z roku 1982 vyslovil předpověď, která překvapila i odborníky. V teoretické studii řetízku magnetických atomů, které se vyskytují v některých materiálech, objevil, že tyto řetízky mají zásadně odlišné vlastnosti v závislosti na charakteru atomových magnetů. V kvantové fyzice existují dva typy atomových magnetů, liché a sudé. Haldane ukázal, že řetízky vytvořené ze sudých magnetů jsou topologické, zatímco řetízky z lichých magnetů jimi nejsou. Podobně jako u topologických kvantových kapalin nelze určit, zda je řetízek atomů topologický, pouhým zkoumáním jeho malé části. A tak jako v případě kvantové kapaliny se topologické vlastnosti projevují na okrajích řetízku — v tomto případě na jeho koncích, poněvadž kvantová vlastnost známá jako spin se zde půlí.

Zpočátku Haldanovým úvahám o atomových řetízcích nikdo nevěřil; vědci byli přesvědčeni, že těmto objektům již dokonale rozumějí. Ukázalo se však, že Haldane objevil první příklad nového druhu topologických materiálů, jejichž studium je nyní předmětem výzkumu ve fyzice kondenzovaných látek.

Kvantové Hallovy kapaliny i magnetické atomové řetízky jsou součástí nové skupiny topologických stavů. Později výzkumníci objevili několik jiných neočekávaných topologických stavů hmoty, a to nejen v řetízcích nebo v tenkých hraničních vrstvách, ale i v běžných trojrozměrných materiálech.

V současnosti se diskutuje např. o topologických izolátorech, topologických supra vodičích a topologických kovech. To jsou příklady oblastí, které se v posledních desetiletích staly předmětem výzkumu ve fyzice kondenzovaných látek, v neposlední řadě i kvůli naději, že topologické materiály budou použitelné pro novou generaci elektronických zařízení a supra vodičů nebo pro budoucí kvantové počítače. Současný výzkum odkrývá tajemství hmoty v exotickém plochem prostoru, který objevili laureáti Nobelovy ceny za rok 2016.