

## Nobelova nagrada za fiziku za 2016. godinu – egzotična stanja materije

|| D. Hrupec\*

Odjel za fiziku  
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera Osijek  
Trg Ljudevita Gaja 6  
31 000 Osijek



### Tko su dobitnici?

Ovogodišnju Nobelovu nagradu za fiziku dijele trojica fizičara britanskog porijekla s uglednih američkih sveučilišta. Polovicu nagrade dobio je David J. Thouless sa Sveučilišta u Washingtonu, jednu četvrtinu F. Duncan M. Haldane sa Sveučilišta Princeton, a drugu četvrtinu J. Michael Kosterlitz sa Sveučilišta Brown. Oni su nagrađeni “za teorijska otkrića topoloških faznih prijelaza i topoloških agregacijskih stanja”.<sup>1</sup> Radi se o egzotičnim stanjima materije na niskim temperaturama. Razumijevanje tih stanja potaknulo je mnoga nova područja istraživanja i dovelo do razvoja novih materijala s dotad nezamislivim svojstvima. Tekst u nastavku prenesen je, uz manje preinake, s portala BugOnline,<sup>3</sup> gdje je autor nedavno komentirao Nobelovu nagradu za fiziku za 2016. godinu.

### Što je uopće topologija?

Kao prvo, topologija nije fizika. To je grana matematike u kojoj se istražuju svojstva prostora s obzirom na kontinuirane transformacije. Kao što je usmjerena dužina samo posebni slučaj vektora – koristan u geometriji i fizici – a u matematici je pojam vektora puno općenitiji, tako i topologija istražuje *topološke prostore* (dobro definirane matematičke objekte koji su daleko izvan opsega ovoga teksta), a poseban slučaj topoloških prostora su trodimenzijska tijela poput kocki, kugli i torusa. U tom posebnom slučaju, topološke transformacije znače deformacije bez kidanja i lijepljenja, kakve se recimo mogu izvoditi s objektima od plastelina. Kocku od plastelina možemo stiskanjem preoblikovati u kuglu. Zato su kocka i kugla isti topološki objekt. Objekt bez rupa. Torus, ili krafna s rupom u sredini, može se topološkim transformacijama preoblikovati, recimo, u šalicu za kavu s drškom. Zato su krafna s rupom (engl. *doughnut*) i šalica za kavu (engl. *mug*) isti topološki objekt. Objekt s jednom rupom. Okvir za naočale je objekt s dvije rupe, a tipični perec objekt s tri rupe. Naravno, fizičari se ne bave baš krafnama i perecima, nego nekim drugim fizičkim objektima kod kojih su važne topološke transformacije i topološke dimenzije. Konkretno, električna vodljivost kvantnih kondenzata raste s topološkom dimenzijom (slika 1). A kvantni kondenzat možemo shvatiti kao jedno agregacijsko stanje materije.

### Koliko agregacijskih stanja poznajemo?

Iz iskustva znamo za tri agregacijska stanja materije: čvrsto, tekuće i plinovito. Također znamo da ista tvar u različitim agregacijskim stanjima ima vrlo različita svojstva. S mikroskopskog gledišta, agregacijska stanja proizlaze iz čvrstoće veza među atomima ili molekulama. U čvrstom stanju veze su najjače, atomi mogu samo

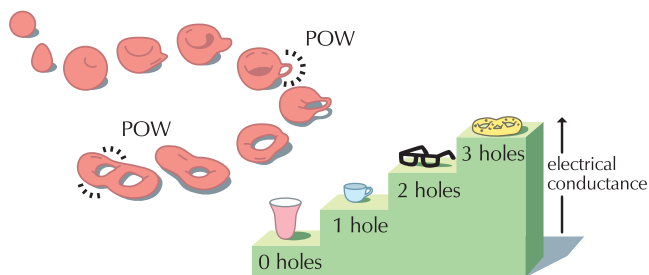


Illustration: ©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Slika 1 – Električna vodljivost kvantnih kondenzata raste s topološkom dimenzijom

titirati oko ravnotežnih položaja. U tekućem stanju veze su labavije. Atomi jesu povezani, ali se mogu lako premještatati unutar tijela. U plinovitom stanju osnovne čestice nisu međusobno vezane ili su jako slabo vezane, i gibaju se svaka za sebe.

Prijelazi iz jednog u drugo agregacijsko stanje, koje nazivamo faznim prijelazima, povezani su s temperaturom. Što je temperatura viša, što zapravo znači da je intenzitet unutarnjeg gibanja veći, to su slabije unutarnje veze među česticama. Zato tvar, s podizanjem temperature, prelazi iz čvrstog u tekuće, a iz tekućeg u plinovito stanje. No, ako plinu nastavimo podizati temperaturu, što znači da se pojedinačne čestice gibaju sve brže i sudaraju sve žešće, onda molekule možemo potrgati u atome, a atome u jezgre i elektrone. Potpuno ionizirana materija, koja je smjesa pozitivnih jezgri i negativnih elektrona, predstavlja četvrto agregacijsko stanje – plazmu. Ako pak temperaturu mijenjamo u suprotnom smjeru, snižavamo ju prema apsolutnoj nuli, ili tvar preoblikujemo u tanki sloj debljine atoma, tada tvar iskazuje sasvim nova i neobična svojstva pa s pravom govorimo o novom agregacijskom stanju – kvantnom kondenzatu. Ako su čestice bozoni (imaju cjelobrojni spin poput fotona ili Higgsovog bozona), onda je to peto agregacijsko stanje – Bose-Einsteinov kondenzat. A ako su čestice fermioni (imaju polucjelobrojni spin poput elektrona ili atomske jezgre), onda je to šesto agregacijsko stanje – fermionski kondenzat (slika 2). Bose-Einsteinov kondenzat otkriven je 1994. godine, a fermionski kondenzat 2004. godine.

### Što su topološki fazni prijelazi?

Intenzitet unutarnjeg gibanja opada s temperaturom. Što je temperatura niža pojedinačne čestice imaju, u prosjeku, sve manju energiju i gibaju se sve sporije. U prirodi postoji najniža moguća temperatura, apsolutna nula. Intuitivno, i u skladu s klasičnom fizikom, to bi odgovaralo apsolutnom mirovanju, situaciji u kojoj više nema nikakvog unutarnjeg gibanja. U stvarnosti, i u skladu s kvantnom fizikom, unutarnje gibanje nikad potpuno ne prestaje, koliko god se približili apsolutnoj nuli. Također, u jednoatomskim slojevima postoje unutarnja “gibanja” koja možemo zamisliti kao

\* Doc. dr. sc. Dario Hrupec  
e-pošta: dario.hrupec@fizika.unios.hr

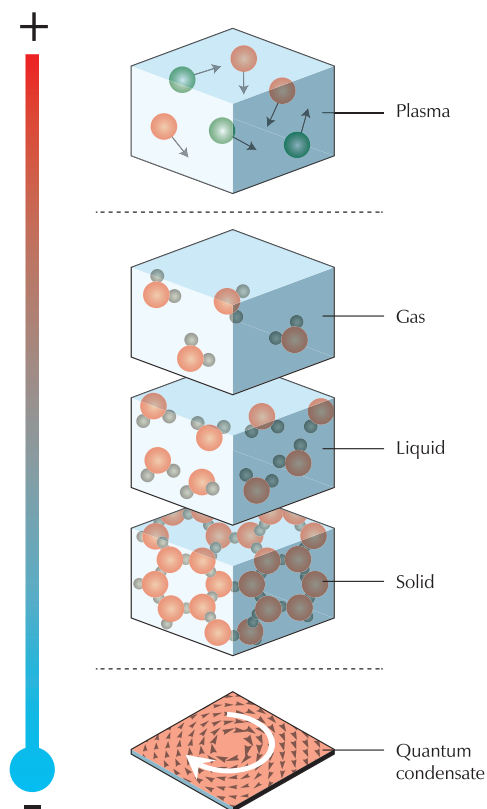


Illustration: © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Slika 2 – Osim čvrstog, tekućeg i plinovitog poznata su još tri agregacijska stanja materije: plazma i dvije vrste kvantnih kondenzata

neke vrloge. Središta tih vrtloga su “rupe”, a za opis prostora s obzirom na rupe postoji matematički alat – topologija. Promjenu kvantnog kondenzata koja je povezana s brojem “rupa”, ili s uparivanjem “rupa” (jesu li sve neovisne ili se grupiraju u parove), nazivamo topološkim faznim prijelazom (slika 3). Kao i svaki fazni prijelaz, i ovaj je povezan s promjenom vanjskih svojstava, primjerice promjenom električne vodljivosti.

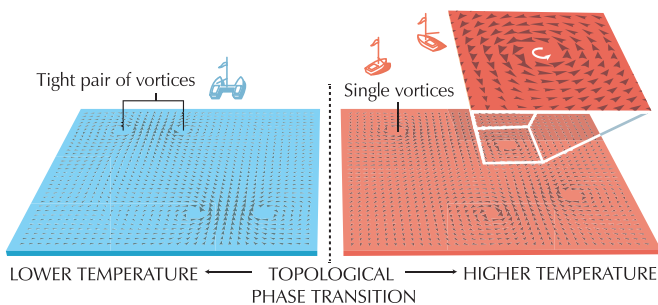


Illustration: © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Slika 3 – Kao svi fazni prijelazi, topološki fazni prijelaz povezan je s promjenom temperature

## Imaju li topološki fazni prijelazi kakvu primjenu?

Za razliku od otkrića Higgsovog bozona, koje je Nobelom nagrađeno 2013. godine, i otkrića gravitacijskih valova, koje će možda biti nagrađeno iduće godine – za što se može dati samo načelni argument da su temeljna istraživanja nužni pokretač primijenje-

nih istraživanja i razvoja tehnologije – otkriće topoloških faznih prijelaza već ima konkretne primjene. Dovelje je do razvoja novih materijala s posve novim svojstvima. Neki od tih materijala topološki su izolatori koji električnu struju vode samo po površini. Postoje opravdane nade da bi takvi materijali mogli odigrati važnu ulogu u razvoju kvantnih računala.<sup>2</sup> A moguće je da će poslužiti i za neke primjene koje danas ne možemo ni zamisliti.



© Trinity Hall, Cambridge University. Photo: Kiloran Howard

### DAVID J. THOULESS

**Rođen:** 1934., Bearsden, Ujedinjeno Kraljevstvo  
**Doktorirao:** 1958., Cornell University, New York, SAD  
**Trenutačno zaposlenje:** zaslužni profesor na University of Washington, Washington, SAD.

Thouless je napravio važne doprinose u teoriji mnoštva čestica. Među ostalim, objasnio je koncept ‘topološkog uređenja’.



Photo: Princeton University, Comms. Office, D. Applewhite

### F. DUNCAN M. HALDANE

**Rođen:** 1951., London, Ujedinjeno Kraljevstvo  
**Doktorirao:** 1978., University of Cambridge, Ujedinjeno Kraljevstvo  
**Trenutačno zaposlenje:** profesor na Princeton University, New York, SAD.

Haldane je poznat po mnogim temeljnim doprinosima u fizici čvrstog stanja, posebice po Haldaneovim pseudopotencijalima u kvantnom Hallovom učinku.



Photo: Brown University

### J. MICHAEL KOSTERLITZ

**Rođen:** 1942., Aberdeen, Ujedinjeno Kraljevstvo  
**Doktorirao:** 1969., University of Oxford, Ujedinjeno Kraljevstvo  
**Trenutačno zaposlenje:** profesor na Brown University, Rhode Island, SAD.

Kosterlitz se bavi fizikom čvrstog stanja. Stručnjak je za fazne prijelaze i kritičnu dinamiku. Njegovo ime nosi prijelaz BKT (Berezinskii–Kosterlitz–Thouless).

## Literatura

1. The Nobel Prize in Physics 2016. URL: [https://www.nobel-prize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2016/](https://www.nobel-prize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2016/) (22. listopada 2016.)
2. A. Cho, Trio snares physics Nobel for describing exotic states of matter. URL: <http://www.sciencemag.org/news/2016/10/trio-snare-physics-nobel-describing-exotic-states-matter> (22. listopada 2016.)
3. D. Hrupec, Topologija i Nobelova nagrada za fiziku 2016. URL: <http://www.bug.hr/vijesti/>.