

NOBEL PENTRU FIZICĂ, 2016

Roman Chirilă

roman.chirila@ici.ro

Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Informatică – ICI București

Rezumat: Trei oameni de știință britanici au câștigat premiul Nobel pentru fizică pentru activitatea lor desfășurată asupra stărilor exotice ale materiei, lucru care poate netezi drumul către calculatoarele cuantice și către alte tehnologii revoluționare. Cercetătorii au fost acreditați pentru rezultatele lor teoretice asupra "tranzițiilor de fază topologice și fazele topologice ale materiei". Împreună, descoperirile lor au transformat radical perspectiva de abordare a oamenilor de știință asupra materialelor. Laureții au folosit metode de matematică avansată, pentru studiul fazelor neobișnuite, sau a stărilor materiei, cum ar fi supraconductorii, superfluidele sau filmele subțiri magnetice. Lucrarea de față este o scurtă prezentare a conceptelor topologice folosite pentru noile materiale care pot fi folosite în noua generație de dispozitive electronice și supraconductoare, sau în viitoarele calculatoare cuantice.

Cuvinte cheie: tranziția KT, efectul Hall cuantic, izolator Chern, teoria benzii topologice.

Abstract: Three British scientists have won the Nobel prize in physics for their work on exotic states of matter that may pave the way for quantum computers and other revolutionary technologies. The researchers were credited for their theoretical work on "topological phase transitions and topological phases of matter". Together, their discoveries transformed how scientists think about materials. They have used advanced mathematical methods to study unusual phases, or states, of matter, such as superconductors, superfluids or thin magnetic films. This paper is a short presentation of the topological concepts used for the topological materials that could be used in new generations of electronics and superconductors, or in future quantum computers.

Key words: KT transition, quantum Hall effect, Chern insulator, topological band theory.

1. Introducere

Anul acesta, the Royal Swedish Academy of Sciences a hotărât ca premiul Nobel pentru fizică să fie acordat lui **David J. Thouless** (de la Universitatea Washington, Seattle, WA, USA), lui **F. Duncan M. Haldane** (de la Universitatea din Princeton, NJ, USA) și lui **J. Michael Kosterlitz** (de la Universitatea din Brown, Providence, RI, USA), pentru descoperirile lor teoretice privind tranzițiile de fază topologice și ale fazelor topologice ale materiei. În conformitate cu declarația de presă a Comitetului Nobel [1], cei trei fizicieni au pus în evidență secrete ale unui univers material exotic, necunoscut, în care materia se presupune a exista în faze ori stări extrem de ciudate. Vorbim aici despre supraconductori, superfluide, sau filme magnetice foarte subțiri, studiate cu ajutorul unor metode matematice avansate, cum ar fi topologia – decisivă pentru remarcabilele descoperiri ale cercetătorilor menționați. Rezultatele lor au condus la înțelegerea teoretică profundă a comportamentului misterios al materiei din domeniul straturilor subțiri, care pot fi foarte ușor approximate cu spații bidimensionale (*flatlands*), sau a firelor extrem de subțiri, care pot fi approximate cu spații unidimensionale, și au creat premisele dezvoltării de noi materiale destinate unor aplicații speciale, sau a celor destinate cu precădere calculatoarelor cuantice [2].

La nivele profunde ale realității materiale, fenomenele sunt guvernate de legi ale fizicii cuantice. Astfel, solidele, lichidele și gazele sunt stări deja obișnuite ale materiei, în care aspectele cuantice sunt cel mai adesea obturate de mișcările haotice la nivel atomic. La temperaturi, însă, extrem de joase, în apropierea lui zero absolut (-273°C), materia exhibă alte noi stări de existență și se comportă de o manieră cel puțin neobișnuită, în sensul că fenomenele cuantice devin brusc vizibile! De pildă, rezistența electrică, dată de toate acele particule în mișcare, brusc dispare, la temperaturi joase. În acest caz, curentul electric se scurge fără oprire printr-un conductor fără rezistență, caz în care vorbim despre un supraconductor. În mod similar, vârtejul dintr-un fluid se va roti fără oprire și fără să încetinească, la temperaturi joase. Cel care a studiat sistematic superfluidele a fost fizicianul rus P. Kapița. În anul 1930, el a reușit să răcească heliul atmosferic până la temperatura de -271°C , caz în care a observat faptul că lichidul răcit urcă pe perețele

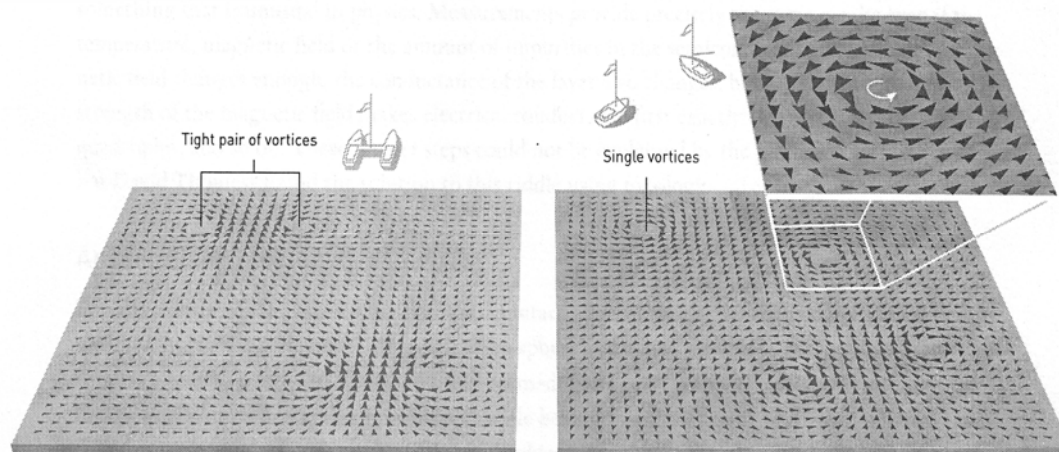
vasului, ca și cum vâscozitatea lichidului dispăruse brusc. În anul 1978, P. Kapița a primit premiul Nobel pentru fizică. De atunci, multe alte superfluide au fost create în laborator [2], fiind în prezent intens studiate: heliul supraconductor, straturi subțiri de materiale magnetice, nanofibre conductoare electrice etc.

2. Perechile strânse de vârtejuri și tranziția KT

În general, credința obișnuită a cercetătorilor din domeniu era aceea conform căreia fluctuațiile termice conduc la distrugerea ordinii din materialele bidimensionale, inclusiv la temperatura de zero grade absolut (0° K). Deci, dacă nu există faze ordonate ale materiei, atunci nu există nici tranziții de fază [2].

Cu toate acestea, pe la începutul anilor 1970, David Thouless și Michael Kosterlitz au reușit să modifice teoria existentă, prin lucrările pe care le-au efectuat în comun la Birmingham, Anglia. Ei au abordat chestiunea tranziției de fază în materialele bidimensionale, *...la început din curiozitate, apoi din ignoranță!* – după propriile lor afirmații. Rezultatul de substanță care a rezultat din colaborarea celor doi fizicieni a constituit cea mai importantă descoperire a secolului al XX-lea din domeniul fizicii materiei condensate și se numește **tranziția KT**, sau tranziția BKT, dacă se ține seama și de fizicianul teoretician rus Vadim Berezinskii, decedat, dar care prezentase și el idei similare cu privire la astfel de tranziții de fază.

În esență, tranziția de fază topologică nu este o tranziție de fază ordinară, simplă, precum cea dintre gheață și apă. Rolul esențial dintr-o tranziție topologică este jucat de micile vârtejuri din materialele bidimensionale. Astfel, la temperaturi joase, se formează așa numitele **perechi strânse de vârtejuri**. Pe măsură ce temperatura crește, asistăm la o tranziție de fază, adică la o dizolvare bruscă a acestor perechi de vârtejuri și transformarea aleatoare a acestora în vârtejuri singulare, care vor naviga individual în interiorul materialului [2]:



Temperatură scăzută ← ← Tranziție de fază topologică → → Temperatură ridicată

Tranziția de fază topologică, fiind considerată cea mai importantă descoperire a secolului al XX-lea din domeniul fizicii materiei condensate: la temperaturi joase, se formează perechi strânse de vârtejuri, care se dizolvă brusc în vârtejuri singulare, la temperatura tranziției de fază [2]

Aspectul absolut senzațional al acestui model este faptul că **tranziția KT are caracter universal**. Ea poate fi folosită pentru absolut orice material bi- sau uni-dimensional, în plus poate fi aplicată și altor domenii din fizică, cum ar fi fizica atomică, sau fizica statistică. Teoria din spatele acestui model explicativ a fost dezvoltată și confirmată experimental de către cei doi fizicieni menționați.

3. Materiale topologice

Încă din anul 1982, Duncan Haldane a trezit uimirea experților în domeniu, prin descoperirea sa conform căreia lanțurile de atomi magnetici care se formează în unele materiale prezintă proprietăți fundamentale diferite, acest lucru depinzând de caracterul atomilor magnetici. În fizica cuantică este bine cunoscut faptul că există două tipuri de atomi magnetici: pari și impari. Haldane a demonstrat faptul că lanțul format din atomi magnetici pari este un lanț topologic, în schimb lanțul cu atomi magnetici impari nu este topologic.

Asemănător cu fluidul cuantic topologic, este imposibil de determinat faptul dacă un lanț atomic este sau nu topologic, doar prin observarea lui parțială. În plus, proprietățile topologice sunt cel mai bine evidențiate la marginile lanțului atomic. În ciuda rezervelor manifestate de către specialiști cu privire la teza avansată de către D. Haldane, acesta din urmă a fost și cel care a descoperit primul exemplu de material topologic, care în prezent constituie cel mai aprins domeniu de cercetare din fizica stării condensate. Astfel, fluidul cuantic Hall și lanțurile de atomi magnetici pari au devenit componente esențiale ale acestui nou grup de stări topologice. Mai mult, cercetătorii au descoperit între timp faptul că stările topologice ale materiei există și în materialele tridimensionale obișnuite.

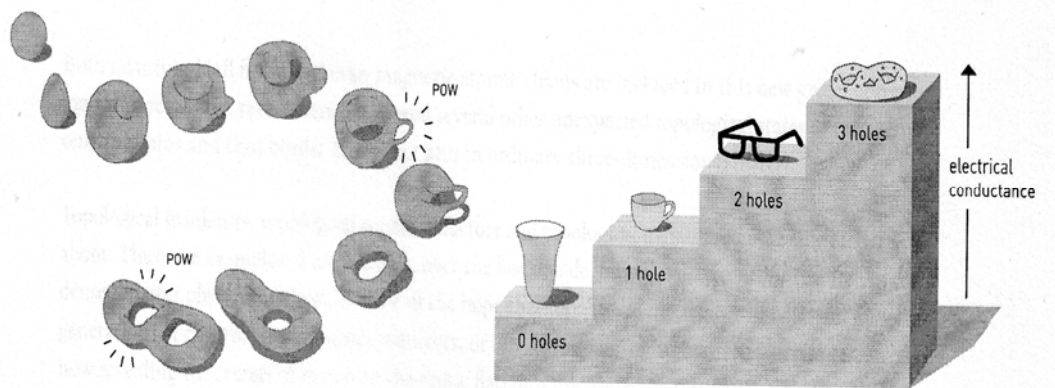
În concluzie, la ora actuală se vorbește intens despre izolatori topologici, despre supraconductori topologici și despre metale topologice. Sunt doar câteva exemple care, pentru ultimul deceniu, definesc frontiera cercetării în domeniul fizicii stării condensate. Cercetarea materialelor topologice va conduce la o nouă generație de supraconductori și materiale electronice pentru viitoarele calculatoare cuantice, considerate ca fiind adevăratele calculatoare ale viitorului.

4. Misterioasele salturi cuantice

Prin anul 1983, David Thouless avansează ideea conform căreia reprezentarea teoretică existentă era incompletă, fiind necesară o nouă teorie asociată fenomenelor care apar la temperaturi joase, sau în prezența unor câmpuri magnetice intense. Noua teorie se bazează pe concepte de topologie. Astfel, unul dintre fenomenele misterioase pe care D. Thouless le-a explicat, folosind topologia, este **efectul Hall cuantic**, descoperit de către fizicianul german Klaus von Klitzing, în anul 1980, fiind recompensat apoi, în anul 1985, cu premiul Nobel pentru fizică. Pentru fizicieni, în general, faptul că un material devine magnetic, când temperatura scade drastic, nu constituie o surpriză. În acest caz, se știe faptul că magneții mici atomici se orientează după o aceeași direcție, producând un câmp magnetic intens, care poate fi măsurat ulterior.

Mirarea fizicienilor a fost provocată de faptul că în stratul subțire dintre doi semiconductori analizat, conductibilitatea electrică prezenta numai anumite valori, în salturi cuantice misterioase. Aceste salturi cuantice, date de numere întregi, erau riguros repetabile, chiar dacă temperatura, sau intensitatea câmpului magnetic, sau concentrația de impurități din semiconductor varia. La modificarea intensității magnetice, conductibilitatea electrică a stratului subțire se modifica și ea, dar numai în trepte. Prin reducerea câmpului magnetic, conductibilitatea electrică devenea întâi dublă ca valoare, apoi triplă, apoi cvadruplă și tot așa. Acești pași întregi nu au putut fi explicați de către comunitatea fizicienilor, până ce David Thouless a găsit soluția explicativă, folosind topologia. În principiu, topologia descrie acele proprietăți care rămân intacte, atunci când un obiect este întins, strâmbat, sau deformat, dar nu și dacă este sfâșiat, sau distrus.

Din această perspectivă, o sferă și o ceașcă aparțin aceleiași categorii, deoarece o excrescență sferică din lut poate fi transformată într-o ceașcă. Cu toate acestea, un covrig cu o gaură în mijloc și o ceașcă de cafea cu o gaură la mâner aparțin altor categorii; totuși, ele pot fi remodelate, pentru a reda forma celeilalte. Altfel spus, topologia, ca ramură a matematicii, se ocupă cu acele proprietăți care se schimbă numai din treaptă în treaptă, exact ca și numărul de găuri din obiectele redată în figura de mai jos [2]:



Elemente de topologie care explică valorile cuantificate ale conductibilității electrice observate la efectul Hall cuantic [2]

Deci, obiectele topologice pot conține o gaură, sau două, sau trei, sau patru și tot așa, dar acest număr trebuie să fie un număr întreg. Prin urmare, acest model poate fi util în a explica valorile cuantificate ale conductibilității electrice observate la efectul Hall cuantic. În acest caz, electronii care se deplasează relativ liber prin stratul subțire aflat între doi semiconductori formează așa numitul fluid cuantic topologic. Electronii din acest fluid cuantic topologic vor prezenta caracteristici surprinzătoare, prin similitudine cu acele proprietăți noi care apar, atunci când mai multe particule se adună la un loc. Așa cum o ceașcă de cafea are o gaură, privind doar o parte din aceasta, tot așa este imposibil de a determina faptul că electronii au format sau nu un fluid cuantic topologic, dacă studiem doar parțial acest lucru. Totuși, trebuie menționat faptul că acea conductivitate electrică descrie mișcarea colectivă a electronilor și, datorită topologiei, aceasta variază în trepte, adică este cuantificată.

O altă caracteristică a fluidului cuantic topologic constă în faptul că marginile sale prezintă proprietăți neobișnuite, lucru prefigurat teoretic și confirmat ulterior pe cale experimentală.

De remarcat este și faptul că în anul 1988, Duncan Haldane a descoperit faptul că fluidul cuantic topologic se poate forma în straturi subțiri de semiconductori chiar și în absența câmpului magnetic. Această descoperire absolut remarcabilă a fost confirmată experimental în anul 2014, într-un experiment cu atomi răciți până aproape de zero absolut.

5. Efectul Hall cuantic

Observat pentru prima dată de către Edwin Herbert Hall [16], efectul Hall clasic constă în apariția unui câmp electric transversal (denumit câmp electric Hall) și a unei diferențe de potențial într-un metal sau semiconductor parcurse de un curent electric, atunci când ele sunt introduse într-un câmp magnetic, perpendicular pe direcția curentului [3].

Astfel, dacă un material conductor (metal sau semiconductor) prin care trece un curent I este plasat într-un câmp magnetic \mathbf{B} perpendicular pe direcția curentului, atunci se observă faptul că, perpendicular pe planul determinat de curent și câmp magnetic, va apărea un câmp electric E . Acest fenomen este cunoscut sub numele de efectul Hall și este utilizat pentru a afla dacă un semiconductor este de tip p sau n , la determinarea concentrației de purtători, sau, prin măsurarea conductivității electrice, σ , se poate calcula mobilitatea purtătorilor de sarcină, μ [4]. Ne putem imagina că în coordonate rectangulare clasice XYZ , curentul I care trece prin materialul nostru este în direcția pozitivă X , câmpul magnetic \mathbf{B} este în direcția pozitivă Z , iar câmpul electric rezultat E este în direcția negativă Y . Prin urmare, între cele două fețe ale materialului nostru va apărea o diferență de potențial U_H , care se numește tensiunea Hall:

$$U_H = \frac{BI}{nqz}$$

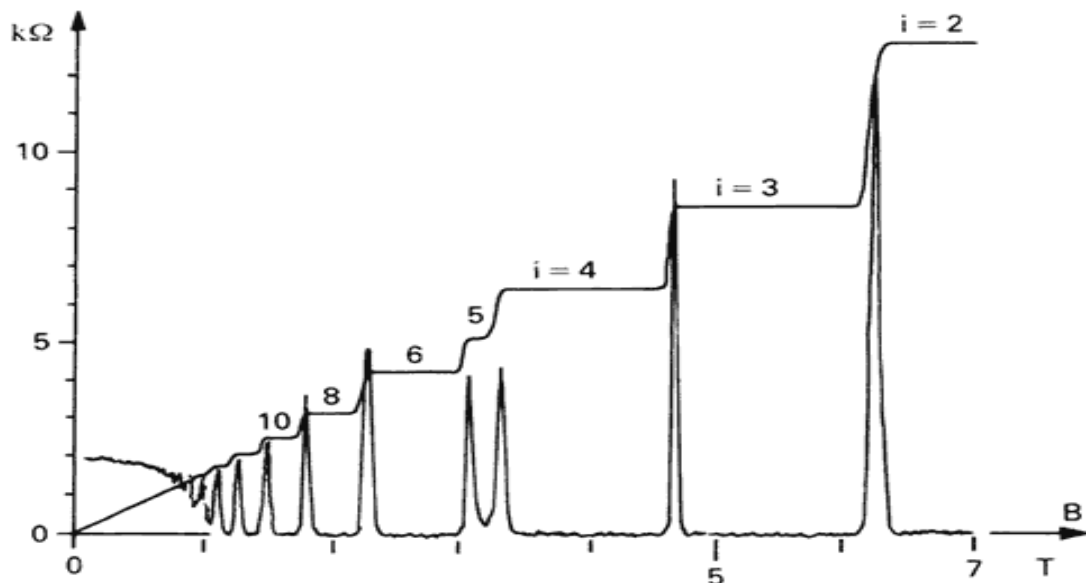
unde, n reprezintă concentrația purtătorilor de sarcină, q – sarcina purtătorilor de sarcină, iar z – lățimea probei (pe direcția axei Z , și a câmpului magnetic, \mathbf{B}).

Din relația de mai sus, prin similitudine cu relațiile cunoscute din electricitate, putem defini rezistența Hall, prin relația:

$$R_H = \frac{U_H}{I} = \frac{B}{nqz}$$

Se observă ușor dependența liniară din rezistența Hall R_H și intensitatea câmpului magnetic, B . Prin urmare, o creștere a valorii lui B va conduce la o creștere corespunzătoare a lui R_H , în conformitate cu relația de mai sus.

Să considerăm acum cazul unei heterostructuri de tip MOSFET a unui tranzistor cu efect de câmp: $GaAs - Al_xGa_{1-x}As$. Neglijând structura de rețea a corpului solid, și considerând doar purtătorii de sarcini cu mobilitate mare, putem spune că avem un gaz electronic bidimensional. Dacă răcim structura astfel format la temperaturi foarte joase, de aproximativ 1K, și se aplică un câmp magnetic intens, de ordinul a 10 T, atunci se observă faptul că dependența liniară din relația precedentă nu se mai păstrează. Mai mult, rezistența rămâne constantă pe anumite paliere ale inducției magnetice, așa cum se observă în figura de mai jos [6]:



Ilustrarea Efectului Hall Cuantic (v. [6])

Experimental s-a observat și faptul că aceste valori ale rezistenței Hall nu depind de natura și de forma materialului folosit, sau de alți factori experimentali, astfel încât rezistența Hall poate fi scrisă și sub forma [5]:

$$R_H = \frac{R_K}{i}$$

unde, R_K este o constantă, numită constanta lui von Klitzig, iar i este un număr întreg. Aceasta este esența efectului Hall cuantic, efect care constă în apariția unor paliere ale tensiunii Hall în funcție de inducția câmpului magnetic, atunci când proba este răcită la temperaturi foarte joase. Altfel spus, rezistența Hall este cuantificată.

Acest efect Hall cuantic a fost descoperit în anul 1980 de către fizicianul german Klaus von Klitzig, care a primit premiul Nobel pentru fizică în anul 1985 pentru această descoperire, considerată crucială pentru înțelegerea și aplicabilitatea fenomenelor cuantice în viitor. De altfel, efectul Hall cuantic reprezintă un caz rarisim de manifestare macroscopică a efectelor cuantice care pot fi studiate cu ajutorul dispozitivelor electronice. Tot din 1985, profesorul K. von Klitzig este directorul Institutului Planck pentru cercetare în fizica stării condensate, fiind și membru în conducerea aceleiași instituții [5].

Revenind la efectul Hall cuantic, s-a observat experimental că valoarea lui R_K corespunde primului palier ($i=1$) și are valoarea:

$$R_H = 25813 \Omega$$

Mai mult decât atât, se pare că această rezistență Hall are un caracter universal și reprezintă o constantă universală, fiind legată de alte două constante universale, și anume constanta lui Plank:

$$h = 6,62606876(52) \cdot 10^{-34} J$$

și sarcina electrică elementară:

$$q_e = 1,602176462(63) \cdot 10^{-19} C$$

Prin urmare, valoarea teoretică a constantei Hall este:

$$R_K = \frac{h}{e^2} = 25812,8075865(31) \Omega$$

La nivel fenomenologic, explicația ia în considerare raportul dintre nivelele Landau (care apar sub acțiunea câmpului magnetic) și nivelul Fermi al gazului electronic [5]. În esență, pentru cazul nostru, al gazului electronic bidimensional, se măsoară componentele ρ_{xx} și ρ_{xy} ale tensorului rezistivitate. Concentrația purtătorilor de sarcină de pe nivelele Landau este:

$$n_L = \frac{q_e B}{h \cdot z}$$

Dacă la o anumită intensitate a câmpului, există un număr de i nivele Landau complet ocupate sub nivelul Fermi, atunci rezistența Hall devine:

$$R_H = \frac{B}{q_e z} \frac{h \cdot z}{q_e B \cdot i} = \frac{h}{q_e^2 i} = \frac{R_K}{i}$$

Dacă avem un nivel Fermi situat între două nivele Landau, atunci electronii nu pot trece dintr-o stare în alta, ceea ce conduce la valoarea de palier a rezistenței Hall: $\rho_{xy} = constant \Leftrightarrow R_H = constant$ și o scădere bruscă a rezistivității electrice ($\rho_{xx} \rightarrow 0$), caz în care gazul ajunge în starea de supraconductibilitate. Numărul întreg i se mai numește și factor de umplere.

Dintre foarte multele aplicații ale efectului Hall cuantic, o menționăm în treacăt doar pe cea care se referă la determinarea inducției magnetice a unor câmpuri foarte slabe. Astfel, acest efect a fost folosit pentru detectarea unor neomogenități în câmpul magnetic terestru, conducând la descoperirea craterului format în urma impactului unui meteorit de dimensiuni mai mar ice a avut loc acum aproximativ 60 milioane de ani în zona peninsulei Yukatan, impact care coincide cu dispariția dinozaurilor; se presupune că a fost cauza principală a dispariției lor [5].

6. Conductibilitatea Hall cuantică

În situații similare cu cele discutate anterior, în cazul unui gaz electronic bidimensional foarte „curat” (adică, cu o mobilitate a sarcinilor electrice de ordinul a $10^5 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$), răcit la temperaturi de 2 K și supus unui câmp magnetic de ordinul a 15 T, s-a observat că și conductibilitatea Hall σ_H este o mărime cuantificată [7]:

$$\sigma_H = n \frac{e^2}{h}$$

unde, n este un număr întreg. Acest rezultat este cu atât mai stupefiant cu cât avem de-a face cu mari variații ale câmpului magnetic, ale concentrației de impurități și a temperaturii. Cum se explică aceste valori cuantice ale conductibilității electrice Hall?

În modelul explicativ adoptat (după excelenta expunere din [7]), se neglijează interacțiile electron-electron și se înlocuiește potențialul de rețea al solidului cristalin printr-o sarcină electrică de fond uniform distribuită. Aceste ipoteze reduc situația de lucru ca fiind cea a unor particule încărcate, deplasându-se independent într-un câmp magnetic. Această problemă a fost rezolvată de către fizicianul rus Landau, care a demonstrat că energia este cuantificată:

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_c$$

cu frecvența ciclotron ω_c având expresia:

$$\omega_c = eB / m.$$

Fiecare dintre aceste nivele Landau prezintă o degenerare macroscopică, astfel încât fiecare stare cuantică ar corespunde unei unități de flux magnetic,

$$\phi_0 = \frac{h}{e} = \frac{2\pi}{e}.$$

Pentru indexarea stărilor degenerate, este convenabil a se folosi impulsul rețelei cristaline, pentru a avea o simetrie de grup care se reduce la simple ‘translații magnetice’ finite. Aceste translații acoperă întreaga rețea cristalină, astfel încât să existe o unitate de flux magnetic prin fiecare celulă elementară a cristalului. Prin urmare, putem indexa funcțiile proprii dintr-o bandă (adică, nivelele Landau), cu un vector din spațiul reciproc. Deci, impulsul rețelei, \vec{k} , va lua valori în prima zonă Brillouin, iar noi vom nota funcțiile de undă din al n -lea nivel Landau prin $u_{\vec{k},n}(\vec{r})$. Trecând peste detaliile de calcul, formula finală care se obține este următoarea:

$$\sigma_H = \frac{e^2}{2\pi h} \sum_{\vec{k} \in Bz} \int d^2k B(\vec{k}, n)$$

unde, *intensitatea câmpului Berry*, B , poate fi calculată din *potențialul Berry*, care este exprimat prin funcțiile de undă, astfel:

$$A_j(\vec{k}, n) = i \langle u_{\vec{k},n} | \partial_{k_j} | u_{\vec{k},n} \rangle.$$

Din cunoștințele de electromagnetism se știe că relația dintre intensitatea câmpului și potențialul vector este dată de o relație de tipul următor:

$$B(\vec{k}, n) = \partial_{k_x} A_y(\vec{k}, n) - \partial_{k_y} A_x(\vec{k}, n).$$

Calculule efectuate asupra conductibilității electrice conduc la următorul rezultat:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{B_z} B(\vec{k}, n) = C_1(n)$$

unde, *primul număr Chern*, C_1 , cunoscut din matematica pachetelor de fibre, este un număr întreg. Acest lucru explică implicit și de ce conductibilitatea electrică este cuantificată, dar și de ce aceasta este insensibilă la variații ale concentrației de impurități, sau a interacțiilor dintre particule. Spunem, deci, că numărul Chern este un **invariant topologic** și că nu poate fi decât un număr întreg. Pentru funcțiile de undă ale problemei Landau, se poate arăta că $C_1 = 1$, pentru orice nivel Landau complet ocupat. Desigur, în lucrările originale, Thouless și colaboratorii săi au inclus și efectul potențialului de rețea ([8]), precum și calculele detaliate pentru sistemele cu impurități [9].

Una dintre consecințele remarcabile ale lucrărilor celor trei fizicieni, Laureați ai premiului Nobel pentru fizică, 2016, îl constituie faptul că putem avea conductibilitate Hall, chiar și în absența câmpului magnetic. Astfel, lucrarea lui Haldane [10] demonstrează teoretic acest fapt, iar faza materiei care corespunde acestei concluzii se numește în prezent **izolator Chern**. În anul 2013, deci la 25 de ani distanță, a fost confirmată experimental această anomalie a efectului Hall cuantic, pe film subțire de $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ dopat cu ioni de Cr, în absența câmpului magnetic, detectându-se această fază a materiei, izolatorul Chern [11].

7. Concluzii

Materia din universul nostru material este organizată în structuri ierarhice. Conform datelor științifice actuale, la bază se află particulele elementare, cum ar fi quarcurile, gluonii, electronii etc. Acestea, la rândul lor, formează atomii și blocurile moleculare. Atomii și moleculele formează gaze, lichide și solide din care sunt formate stelele și planetele, care se pot grupa în galaxii, sau clustere, producând în final universuri întregi. Tot din atomi și molecule se pot forma macro-molecule, precum proteinele și ADN-ul, din care pot rezulta celulele. Din celule obținem organele, care împreună pot forma organisme: animale și plante, într-o impresionantă varietate de specii. Totalitatea speciilor și individualităților formează ecologia.

O parte a științei se ocupă cu studiul sistemelor disecate în părți din ce în ce mai mici, fiind descoperite și studiate comportamentul și proprietățile de pe fiecare nivel studiat. Pe de altă parte, mecanica statistică se ocupă cu interacțiile dintre componente, cum ar fi atomii, încercând să deducă acel comportament colectiv coerent specific care se degajă din colectivitățile de atomi de pe un anumit nivel, conferind nivelului respectiv anumite proprietăți.

Laureații despre care am vorbit în acest material au reușit să descopere în detaliu modul exotic al unui anumit nivel de organizare atomică a substanței de a determina anumite structuri colective coerente: defectele topologice, sau faze topologice de existență ale materiei. Defectele topologice pot fi sarcini coulombiene în structuri bidimensionale, dislocații în cristale bidimensionale, vârtejuri (vortexuri) în supraconductorii bidimensionali etc. Interacția dintre aceste defecte topologice depinde logaritmice în majoritatea covârșitoare a cazurilor de separarea lor spațială, ceea ce conduce la un anumit comportament colectiv și care în mod spectaculos determină un anumit tip de fază de tranziție [13], așa cum este tranziția KT (Kosterlitz - Thouless), care este considerată cea mai importantă descoperire a secolului al XX-lea din domeniul fizicii materiei condensate [14], [15].

Anul trecut, premiul Nobel pentru fizică a fost decernat unor fizicieni care au rezolvat uriașul mister al neutrinelor solari, adică al acelor ‘micimi neutrale’ – cum ar zice italienii! Mii de miliarde din aceste particule fantomatice ne străbat zilnic, în fiecare secundă, fără să ne putem opune lor. Inițial, cercetătorii au crezut că aceste particule sunt ca fotonii, lipsiți de masă. Măsurătorile efectuate pe neutrinii solari au demonstrat faptul că sunt detectați doar o treime din totalul neutrinelor emiși de către Soare, ceea ce a sporit și mai tare misterul legat de aceste... micimi neutrale. Laureații premiului Nobel de anul trecut, Takaaki Kajita și Arthur McDonald, au descoperit faptul că neutrinii au de fapt masă și că, pe distanța dintre sursa emitentă și detector,

neutriniilor își pot schimba identitatea [12].

Anul acesta, fizicienii David Thouless, Duncan Haldane și Michael Kosterlitz au primit premiul Nobel pentru fizică, iar munca lor poate pava drumul către calculatoarele cuantice și alte tehnologii conexe. Acești cercetători remarcabili au fost recompensați atât pentru lucrările lor teoretice despre tranzițiile de fază topologice și fazele topologice ale materiei, cât și pentru lucrările lor experimentale de excepție. Descoperirile lor, luate la un loc, au transformat radical perspectiva de abordare a oamenilor de știință asupra noilor materiale. Stările speciale de existență a materiei au fost explicate prin apariția unor proprietăți electrice cu totul speciale, cum ar fi supraconductibilitatea, când electronii capătă brusc abilitatea de a se deplasa fără rezistență printr-un material răcit la temperaturi foarte joase, sau efectul Hall [16], sau efectul Hall cuantic [17].

Steve Bramwell, un fizician de la UCL, a subliniat importanța lucrărilor premiate, afirmând faptul că materialele din jurul nostru au de multe ori un comportament complex, sau de neînțeles. Munca cercetătorilor este de a identifica principii simple prin care să putem înțelege universul materialelor noi și să putem prefigura noile fenomene care pot apărea. Evident, acest lucru nu este o treabă deloc ușoară, deoarece la un material este vorba mai mereu de miliarde și miliarde și miliarde de atomi, aceștia interacționând între ei, deci nu este prea ușor să descoperi anumite legități sau comportamente statistice ale acestora. Iar bugetele necesare cercetării sunt tot mai importante, dar fără prioritatea pe care o merită din partea politicienilor [12].

Sir Martin Rees, un fizician remarcabil de la Universitatea din Cambridge și a Observatorului Astronomic Regal, a comentat cu ironie și amărăciune faptul că premiul Nobel pentru fizică a fost câștigat de către cei trei cercetători remarcabili, de origine britanică (**David J. Thouless**, născut în anul 1934, în Bearsden, UK; **F. Duncan M. Haldane**, născut în anul 1951, în Londra, UK; **J. Michael Kosterlitz**, născut în anul 1942, în Aberdeen, UK.), dar în contul Statelor Unite ale Americii, acolo unde aceștia își desfășoară activitatea. Prin anii 1980, cei trei fizicieni au fost nevoiți să plece din Anglia către SUA, după ce bugetele universităților au fost stoarse de către guvernul Thatcher [12]. Premiul Nobel acordat acestor savanți de excepție vine parcă să recompenseze munca lor asupra unor stări exotice ale materiei, muncă prilejuită de exodul lor transoceanic.

BIBLIOGRAFIE

1. https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2016/press.html;
2. https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2016/popular-physicsprize2016.pdf;
3. https://ro.wikipedia.org/wiki/Efectul_Hall;
4. <http://electronics.ucv.ro/mihaium/Materiale%20didactice/MATERIALE2013/MaterSubEx32.pdf>;
5. <http://asobor0.tripod.com/HallCuantic.pdf>;
6. **TONG, D.:** The Quantum Hall Effect, <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/qhe/qhe.pdf>;
7. https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2016/advanced-physicsprize2016.pdf;
8. **THOULESS, D. J.; MAHITO KOHMOTO; NIGHTINGALE, M. P.; DEN NIJS, M.:** Quantized Hall conductance in a two-dimensional periodic potential. *Physical Review Letters*, 49(6):405, 1982;
9. **NIU, QIAN; THOULESS, D. J.; YONG-SHI WU:** Quantized Hall conductance as a topological invariant, *Physical Review B*, 31(6):3372, 1985;

10. **HALDANE, F. D. M.:** Model for a Quantum Hall Effect without Landau Levels: Condensed-Matter Realization of the "Parity Anomaly", *Physical Review Letters*, 61(18):2015, 1988;
11. **CUI-ZU CHANG; JINSONG ZHANG; XIAO FENG; JIE SHEN; ZUOCHENG ZHANG; MINGHUA GUO; KANG LI; YUNBO OU; PANG WEI; LI-LI WANG et al:** Experimental observation of the quantum anomalous Hall effect in a magnetic topological insulator, *Science*, 340(6129):167, 2013;
12. <https://www.theguardian.com/science/2016/oct/04/david-thouless-duncan-haldane-and-michael-kosterlitz-win-nobel-prize-in-physics>;
13. **HENRIK JELDTOFT JENSEN:** The Kosterlitz-Thouless Transition, Department of Mathematics, Imperial College, <http://www.mit.edu/~levitov/8.334/notes/XYnotes1.pdf>;
14. **KOSTERLITZ, J. M.; THOULESS, D. J.:** Ordering, metastability and phase transitions in two- dimensional systems, *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 6(7): 1181–1203, 1973;
15. https://en.wikipedia.org/wiki/Kosterlitz-Thouless_transition;
16. **HALL, E. H.:** *Amer. J. Math.* 2, 287 (1879);
17. **Von KLITZING, K.; DORDA, G.; PEPPER, M.:** *Phys. Rev. Lett.* 45(6), pp. 494-497, 1980.