

Mezoscopska fizika i valna priroda elektrona

Dinko Babić

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički Fakultet Sveučilišta u Zagrebu

1. UVOD

Nedavni napredak u tehnologiji proizvodnje naprednih uzoraka, koji je započeo krajem 80-tih a zahuktao se tijekom 90-tih godina, omogućio je ostvarivanje struktura čije su dimenzije usporedive s karakterističnim duljinama fizikalnih procesa u krutinama, npr. sa srednjim slobodnim putem vodljivih elektrona. Time je došlo do razvoja discipline fizike čvrstog stanja koju nazivamo *mezoscopska fizika*.

Mezoscopska fizika istražuje svijet koji je dovoljno velik da su statističke metode fizike čvrstog stanja još uvijek primjenjive, ali i dovoljno mali da kvantna priroda elektrona dolazi do izražaja. Radi se o uzorcima i strukturama čija je veličina tipično u rasponu od 10 nm do 10 μ m, to jest od stotinjak do nekoliko stotita tisuća međuatomskih razmaka. Možda je najprimjerenije da mezoskopke uzorke nazivamo *napravama* - jer doista se radi o dizajnu struktura od strane čovjeka. Drugim riječima, dok u mnogim poljima fizike priroda oblikuje uzorke (npr. monokristale) a mi samo asistiramo u takvim procesima, mezoscopske strukture gotovo su inženjerski proizvod ljudske inventivnosti.

Istraživač, dakle, poznavajući osnove ponašanja elektrona u krutinama zamišlja napravu točno određenih geometrijskih omjera i načinjenu od izabranih materijala, koja bi prema njegovoj ideji mogla rezultirati nekim svojstvima. On tada ulazi u laboratorij i proizvodi upravo takvu napravu. Taj je pristup doduše poznat već desetljećima, u proizvodnji elektroničkih naprava (npr. integrirani krugovi), ali su i najsitnije poznate komponente računalnih procesora u visokom stupnju integracije, veličine od oko 300 nm, za standarde mezoscopske fizike prilično velike. Nadalje, elektronička industrija bazira se isključivo na poluvodičima i njihovim svojstvima, dok mezoscopska fizika uključuje mnogo širu paletu ne samo materijala već i fizikalnih pojava.

Ono što čini mezoscopsku fiziku posebnom jest, naravno, *veličina naprava*. Smanjimo li objekt promatranja u nekom pokusu, sve ono što je u velikom uzorku načinjenom od istog materijala bilo zasjenjeno makroskopskim svojstvima sad izlazi na vidjelo. Vrlo je instruktivna usporedba s optikom. Sve dotle dok je veličina optičke naprave (npr. leće) mnogo veća od valne duljine svjetlosti govorimo o *geometrijskoj optici*, tj. valna priroda svjetlosti ne manifestira se. Ako je optička naprava (npr. optička mrežica) veličine usporedive s valnom duljinom svjetlosti, valna priroda svjetlosti dominira i govorimo o *fizikalnoj optici*. U kvantnoj mehanici pokazuje se da svaka čestica, pa tako i elektron, u određenom smislu pokazuje valna svojstva (karakterističnu valnu duljinu nazivamo de Broglieva valna duljina λ_{dB}). U velikim uzorcima, mnogo većim od λ_{dB} , valna priroda elektrona nevažna je, i elektron se ponaša kao točkasti naboj. U uzorcima koji su usporedivi s λ_{dB} elektroni su prije svega kvantni objekti, i njihova valna svojstva dominiraju ponašanjem sustava.

Materijali koji se koriste za pravljenje mezoscopskih naprava ustvari su jednostavni, pa je glavna karakteristika mezoscopske fizike tehnološki pristup u smislu minijaturizacije i proučavanja pojava koje su vezane uz veličinu fizikalnih sustava, a ne istraživanje kompleksnih materijala. Kao normalan metal (tj. koji nije supravodljiv ili magnetičan) koristi se zlato, srebro ili bakar, kao supravodič aluminij ili niobij, kao poluvodič silicij, galijev

arsenid ili GaAs/GaAsAl strukture, kao feromagnet nikal ili željezo. No, mezoskopska fizika koristi i neke proizvode bilo prirode bilo organske kemije, tj. velike molekule, kao dijelove naprava. Tu možemo spomenuti ugljikove nanocjevčice, vodljive polimere (npr. polipirrol) ili čak i lance deoksiribonukleinske kiseline (DNK)!

Na slici 1 prikazane su određene karakteristične veličine, tj. dimenzije nekih struktura i karakteristične duljine nekih elektronskih procesa. Podrobnije objašnjenje nekih od tih duljina bit će dano u daljnjem tekstu, ali već ovdje možemo spomenuti nešto vrlo važno: *ako je veličina naprave usporediva s nekom od karakterističnih duljina, naprava pokazuje svojstva različita od onih koji ima isti materijal makroskopskih dimenzija.*

1 mm	srednji slobodni put elektrona u režimu kvantnog Hallvog efekta
100 μm	duljina fazne koherencije elektrona u poluvodičima visoke mobilnosti (na $T < 4 \text{ K}$)
10 μm	
1 μm	duljina fazne koherencije elektrona u metalima (na $T < 4 \text{ K}$) duljina ugljikovih nanocjevčica valna duljina svjetlosti veličina komercijalnih poluvodičkih naprava
100 nm	
10 nm	de Broglieva valna duljina elektrona u poluvodičima srednji slobodni put elektrona u polikristalnim metalima promjer višeovojničnih ugljikovih nanocjevčica
1 nm	promjer jednoovojničnih ugljikovih nanocjevčica de Broglieva valna duljina elektrona u metalima udaljenost atoma
0.1 nm	

Slika 1: Neke karakteristične veličine važne za raspravu o mezoskopskoj fizici.

Obuhvatiti u jednom predavanju sve pojave koje su specifične za male naprave nemoguće je, jer takvih je mnogo a i bivaju otkrivane doslovce svakodnevno. Također, razumijevanje nekih teško je bez dobrog poznavanje fizike čvrstog stanja, prije svega njezinih

kvantnomehaničkih aspekata. Stoga ću se ograničiti na rezultate koji su po svojoj prirodi spektakularni ali ipak i donekle lako razumljivi, te danas već postaju dijelovima predavanja na sveučilištima.

Valja odmah na početku jasno specificirati još jednu stvar, koja se odnosi na cijelo izlaganje. *Rezultati koje ću prezentirati odnose se na niske temperature, tipično ispod 4 K.* Postoje doduše pokusi u mezoskopskoj fizici koji se rade na višim temperaturama, ali se valna priroda elektrona, koja nas ovdje zanima, ipak u cijelosti manifestira samo na niskim temperaturama.

2. ELEKTRON IMA VALNU DULJINU

Svako tijelo u gibanju ima valna svojstva. No, ona se u makroskopskih objekata ne opažaju. Naime, de Broglieva valna duljina dana je izrazom $\lambda_{dB}=h/mv$, gdje je $h=6.625 \times 10^{-34}$ Js Planckova konstanta, m masa a v brzina objekta. Kako je masa makroskopskih objekata velika, to znači da je pripadna λ_{dB} vrlo mala, te su velika tijela klasične “čestice” čije je gibanje dobro opisano Newtonovim zakonima. Mikroskopski objekti poput elektrona imaju puno veću valnu duljinu, te su njihova svojstva opisana kvantnom mehanikom. No, kao što je već rečeno, ako je medij u kojem se elektron giba velik, valna svojstva opet se velikim dijelom “utapaju” u klasičnim svojstvima medija. Kako, dakle, možemo ustanoviti da li je hipoteza o valnom karakteru elektrona ispravna? Pa, načinimo uzorak malim!

2.1 Kvant provodnosti

Da bismo opisali pokuse u kojima se iskazuje valna priroda elektrona, moramo uvesti veličinu koja se naziva *kvant provodnosti* (*conductance quantum*). Njegovo ishodište je ponešto komplicirano, pa ćemo izbjеći ulaženje u detalje i definirati kvant provodnosti kao

$$G_0 = e^2/h = 1/25.8128 \text{ k}\Omega,$$

gdje je $e=1.6 \times 10^{-19}$ C naboj elektrona. Pripadni otpor $R_0 = 1/G_0$ naziva se jedan *klitzing*, prema njemačkom znanstveniku von Klitzingu koji je dobio Nobelovu nagradu za kvantni Hallov efekt. Ta se vrijednost danas koristi kao najpouzdaniji standard za električni otpor.

Primjetimo da u izraz za G_0 ulazi Planckova konstanta, što znači da je porijeklo G_0 u kvantnomehaničkim svojstvima elektrona. Naime, kad god je h dio nekog izraza, tad je njegovo ishodište kvantna mehanika.

2.2 Dvodimenzionalni elektronski plin

Stavimo li u kontakt dva specifična poluvodiča, nedopirani (isti broj elektrona i šupljina) GaAs (i-GaAs) i n-dopirani (mnogo više elektrona nego šupljina) GaAsAl (n-GaAsAl), dogodit će se zanimljiva stvar. Naime, mnogi će elektroni iz GaAsAl “pobjeći” prema GaAs, ali neće prodrijeti duboko, svega desetak nanometara. To u konačnici rezultira time da se na granici GaAs i GaAsAl stvori *dvodimenzionalni elektronski plin* (*two-dimensional electron gas*; kratica 2DEG), to jest elektronski sistem u kojem se elektroni mogu gibati samo uzduž granice dvaju materijala, ali ne i okomito na nju.

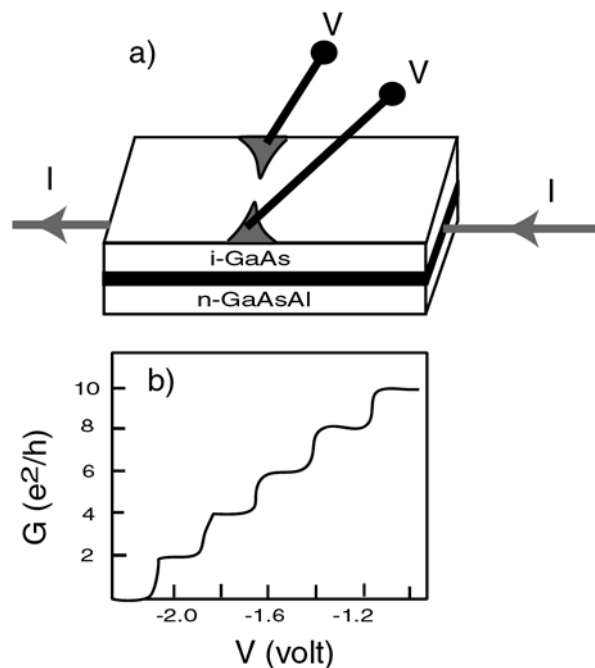
2DEG ima nekoliko osobitih svojstava. Prvo, elektroni su u njemu vrlo mobilni, tj. lako se gibaju, tako da se 2DEG koristi za vrlo brze tranzistore (HEMT – *high electron mobility transistors*). Drugo, nametnemo li električno polje okomito na 2DEG, dakle u smjeru u kojem se elektroni ne mogu gibati, možemo smanjiti broj mobilnih elektrona. To se radi

tako da se na uzorak napare “vrata” (*gate*), tj. metalna elektroda, i na nju nametne negativni napon. Jer je 2DEG duboko u uzorku te se elektroni ne mogu gibati prema elektrodi, učinak elektrode je isključivo u elektrostatičkom osiromašenju koncentracije vodljivog naboja. Ta se metoda koristi i npr. kao princip rada MOSFET-a (*metal-oxide-semiconductor field effect transistor*), koji je vrlo zastupljena naprava u modernoj elektronici.

2.3 Kvantne stepenice u vodljivosti

Naprimo li dvije takve male elektrode na uzorak jednu nasuprot drugoj, svaka će osiromašiti koncentraciju vodljivih elektrona u 2DEG-u ispod sebe same, pa će se elektroni moći gibati *jedino kroz uski procjep definiran elektrodama*. Takva konfiguracija elektroda često se naziva *split-gate konfiguracija*, te je prikazana na slici 2a. Kako postojanje procjeka utječe na provodnost naprave?

Primjenjujemo li sve negativniji napon na elektrode, proces osiromašenja vodljivog naboja bit će sve izraženiji, i procjep će se efektivno sužavati. Kad bi elektroni bile klasične čestice, tad bi provodnost ovakve naprave padala s povećanjem negativnog napona na vratima na *kontinuiran i gladak način*. Opaža se međutim nešto sasvim drugo.



Slika 2: (a) Split-gate konfiguracija u 2DEG strukturi. 2DEG je naznačen kao crna traka; elektroni se mogu gibati *samo u* 2DEG, ali ne i okomito na njega. Propustimo li struju I kroz 2DEG kako je naznačeno na slici, moći ćemo mjeriti provodnost uzorka kao funkciju negativnog napona V na vratima (naparene metalne elektrode). Ispod elektroda je koncentracija vodljivih elektrona u 2DEG-u mala, pa postoji uski procijep kroz koji se elektroni gibaju. Rezultat takvog pokusa prikazan je u (b), te objašnjen u tekstu.

Rezultat pokusa, tj. provodnost G (u jedinicama kvanta provodnosti G_0) kao funkcija napona na elektrodama V , prikazan je na slici 2b. Provodnost je stepeničasta, a ne glatka funkcija napona na elektrodama. Kako to razumjeti? Pa, ovakav rezultat ima objašnjenje *jedino ako elektron doista ima valna svojstva*. Precizan račun pokazuje da je valna duljina elektrona λ_F (za elektrone u vodičima uobičajen je naziv *Fermijeva valna duljina*, te se stoga najčešće koristi simbol λ_F) u 2DEG-u u rasponu od 30 do 50 nm. Da bi elektron prošao kroz

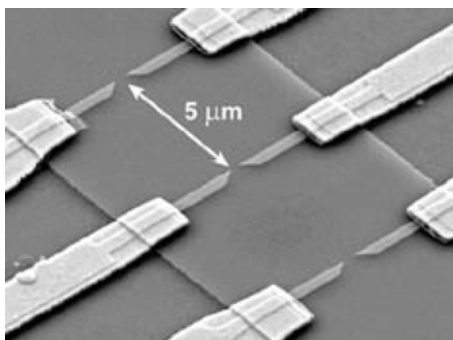
procjep, njegov val mora imati čvorove na rubovima procjeka (tj. mora činiti stojni val), što znači da širina procjeka W mora biti $n\lambda_F/2$, gdje je $n=1,2,3,\dots$. Ako je napon V velik, procjep je vrlo uzak i elektroni ne prolaze kroz njega. U trenutku kad je $W=\lambda_F/2$ neki elektroni počinju prolaziti kroz procjep, i $G=2G_0$. Smanjujemo li negativni napon V i dalje, širina procjeka će se povećavati, ali se provodnost neće mijenjati sve dok se ne postigne $W=\lambda_F$, kad još jedan dio elektrona može proći, te G stepeničasto skače na vrijednost $4G_0$, itd. Provodnost ne skače u jedinicama G_0 već u jedinicama $2G_0$ jer prolaze istovremeno dvije vrste elektrona, oni koji imaju spin $-1/2$ te $1/2$.

Sveobuhvatna teorija koja objašnjava ovaj i mnoge druge slične pokuse naziva se *Landauer-Buettikerova teorija*. U konkretnom slučaju, provodnost je dana s

$$G = 2G_0 \text{Int} (2W/\lambda_F),$$

gdje je Int cjelobrojna vrijednost argumenta $2W/\lambda_F$. Primijetimo da je ovaj rezultat direktna posljedica malih dimenzija naprave. Samo jer su elektrode odmaknute za udaljenost koja je usporediva s λ_F , opažanje stepeničaste strukture je moguće. Kad bi udaljenost elektroda bila mnogo veća od λ_F , stepenice bi se utopile u kontinuiranom padu G s povećanjem negativnog V , što i očekujemo za klasične čestice.

Fotografija jedne slične strukture, koja sadrži tri split-gate para, dana je na slici 4. Fotografija je načinjena skanirajućim elektronskim mikroskopom (*scanning electron microscope*; kratica SEM), kojim možemo opažati objekte dimenzija dolje do nekoliko nanometara. Taj je uzorak korišten u jednom kompliciranijem pokusu, koji izlazi iz okvira ovog izlaganja.



Slika 3: SEM fotografija jednog 2DEG uzorka, s tri split-gate para.

3. KVANTNA INTERFERENCIJA ELEKTRONA

Mnogi će čitaoc prigovoriti da je 2DEG jedan dosta ekskluzivan materijal, te da je stoga pokus o kvantnim stepenicama u provodnosti nešto što je u području interesa uskog kruga znanstvenika i tehnologa. U neku ruku takav bi se prigovor mogao učiniti opravdanim, ako se taj pokus shvati samo kao dio akademske rasprave o valnoj prirodi elektrona.

Ipak, valja napomenuti da je 2DEG osnova širokog polja tehnoloških primjena. Ne samo da se 2DEG koristi u konvencionalnoj poluvodičkoj elektronici, već je također osnova proučavanja kvantnog Hallovog efekta – čije su posljedice dalekosežne i za fundamentalnu znanost i za tehnologiju.

Mi ćemo ipak izbjeći ulaženje u detalje kvantnog Hallovog efekta, te s osvrnuti na materijale koji su nam vrlo bliski – normalne metale. Uzmimo, na primjer, zlato. Taj metal svi poznajemo, znamo da je čist i kemijski ne reagira s ostalim elementima, da je kovan, te dobar

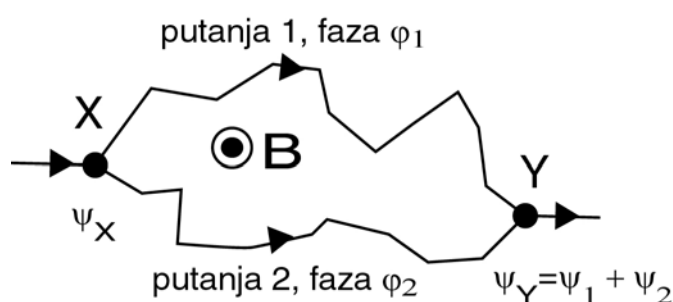
vodič električne struje. Uzmemo li makroskopski komadić zlata, propustimo struju kroz njega i mjerimo pad napona, nećemo naći išta neobičnog. Zatim možemo taj isti uzorak staviti u magnetsko polje, ponoviti isti pokus, i naći ćemo da je utjecaj magnetskog polja zanemariv, najčešće i nemjeriv.

Zaključili bismo da se elektroni ponašaju kao klasične čestice. Zatim bismo izračunali λ_F i našli da je reda veličine razmaka među atomima, te bili skeptični prema bilo kakvoj manifestaciji valne prirode elektrona, iz čistog razloga što tako male naprave ipak ne možemo praviti. *No, takav zaključak je pogrešan – naime, λ_F nije jedina veličina koja opisuje valni karakter elektrona!* Elektroni pokazuju efekte interferencije, a ona je određena veličinom koju nazivamo *duljina fazne koherencije* L_ϕ , koja je na niskim temperaturama mnogo veća od λ_F . Duljina fazne koherencije, ugrubo rečeno, predstavlja onu udaljenost preko koje je elektronski val (valne duljine λ_F) dobro definiran u prostoru. U pokusu prezentiranom u poglavlju 2.3, L_ϕ je mnogo veća od λ_F .

3.1 Pojam faze elektrona

Faza nekog vala dobro je poznat koncept, kao i fazni pomak. Na primjer, zbrojimo li dva vala (iste valne duljine) koji imaju razliku faza (fazni pomak) π , rezultat će biti nula, to jest valovi će se poništiti. Ako je fazni pomak nula, valovi će se zbrojiti na način da je njihov zbroj maksimalan

Jednadžba koja opisuje kvantnomehaničke čestice naziva se *Schroedingerova jednadžba*. Dok Newtonova jednadžba klasičnih čestica daje kao rješenje traektoriju čestice kao funkciju vremena, Schroedingerova jednadžba daje kao rješenje tzv. *valnu funkciju* ψ , koja je kompleksna veličina, i u principu ovisi i o položaju $\mathbf{r}$ i o vremenu t . Njeno je značenje da je njen apsolutni kvadrat $f^2 = \psi^* \psi$, tj. umnožak valne funkcije ψ i njenog kompleksnog konjugata ψ^* , gustoća vjerojatnosti da se čestica nalazi u položaju $\mathbf{r}$ u vremenu t . Možemo pisati $\psi = f \exp(i\phi)$, gdje je i imaginarna jedinica, $\exp$ eksponencijalna funkcija a ϕ *faza kvantnomehaničke čestice*. Takav zapis, pokazuje se u matematici, dobar je opis valnih pojava. Vrijedi: $\exp(i\phi) = \cos(\phi) + i \sin(\phi)$. Iako se ϕ gubi u izrazu za f^2 , ona se iskazuje u pokusima koji dotiču *interferenciju* elektrona kao valova.



Slika 4: Prikaz dvije moguće putanje elektrona od točke X do točke Y, s pripadnim fazama. Ako se primjeni magnetsko polje B kako je prikazano na slici, razlika faza dviju putanja proporcionalna je magnetskom toku kroz površinu omeđenu dvama putanjama.

Još je jedno svojstvo kvantne mehanike važno. Da bi kvantnomehanička čestica došla iz jedne točke u drugu, ona može ići preko različitih traektorija, dok Newtonova jednadžba klasične fizike dozvoljava samo jednu. Promotrimo na slici 4 elektron koji se giba kroz metal iz točke X u točku Y. On može izabrati više puteva, a zbog jednostavnosti označili smo samo dva. U točki X elektron ima fazu ϕ_X , na putanji 1 fazu ϕ_1 , a na putanji 2 fazu ϕ_2 . Kako je metal

uniforman medij, funkcija f ista je za sve točke prostora, tj. vjerojatnost da se elektron nađe u bilo kojoj točki prostora jednaka je. No, *faza nije nužno ista za sve putanje*. U točki Y se valne funkcije ψ_1 i ψ_2 , koje odgovaraju putanjama 1 i 2, zbrajaju, te je $\psi_Y = f [\exp(i\varphi_1) + \exp(i\varphi_2)]$. Apsolutni kvadrat $F = \psi_Y^* \psi_Y = 2f^2 + 2f^2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$, koji daje vjerojatnost da elektron dođe u točku Y, ima dva člana. Prvi ($2f^2$) predstavlja vjerojatnost dolaska elektrona kao klasične čestice, a drugi ($2f^2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$) je kvantnomehanički član, koji uzima u obzir interferenciju putanja 1 i 2: ako je $\varphi_1 = \varphi_2$ elektronski valovi se zbrajaju i vjerojatnost je najveća, a ako je $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi$ elektronski valovi se oduzimaju i vjerojatnost je najmanja. Dakle, vjerojatnost dolaska elektrona iz X u Y ima kvantnomehanički interferentni član.

Da bismo razumjeli dva pokusa o kojima će biti riječi, moramo proučiti i utjecaj magnetskog polja na fazu elektrona. Elektron je nabijena čestica, pa on stoga osjeća magnetsko polje, što se reflektira na fazu. Pokazuje se da je fazna razlika $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ dviju traektorija što zaokružuju površinu A kroz koju prolazi okomito magnetsko polje B dana izrazom

$$\Delta\varphi = 2\pi BA/(h/e) = 2\pi \phi / \phi_0$$

S $\phi = BA$ označili smo magnetski tok kroz površinu A , a $\phi_0 = h/e = 4.14 \times 10^{-15} \text{ Tm}^2$ nazivamo *kvant magnetskog toka*. Primjetimo da izraz za ϕ_0 sadrži Planckovu konstantu, pa je stoga ϕ_0 kvantnomehaničkog porijekla.

3.2 Duljina fazne koherencije elektrona

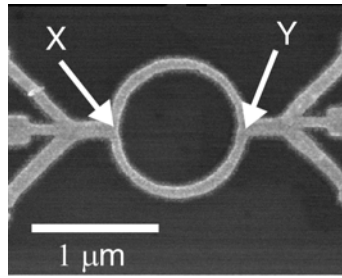
Interferencija elektrona nije moguća ako su točke X i Y previše udaljene. Procesima raspršenja elektrona faza φ se mijenja, te nakon velikog broja raspršenja postaje posve nasumična veličina. Stoga i fazna razlika $\Delta\varphi$ postaje nasumična, te se interferentni član usrednjuje u nulu. Dakle, postoji maksimalna udaljenost do koje možemo opaziti interferenciju elektrona, a tu duljinu nazivamo *duljina fazne koherencije elektrona* L_φ . To je temperaturno ovisna veličina, i njena tipična vrijednost u metalima poput zlata na $T = 1\text{K}$ iznosi oko $1 \mu\text{m}$.

Drugim riječima, elektronski val, koji ima valnu duljinu λ_F , nakon udaljenosti L_φ zaboravlja koju je fazu imao u početnoj točki, pa i ne može iskazivati nikakve interferentne efekte preko udaljenosti veće od L_φ .

Procesi raspršenja koji uzrokuju konačnost L_φ su neelastični elektron-elektron sudari, raspršenje elektrona na termičkim titranjima atoma (fononima) i raspršenje elektrona na magnetskim nečistoćama.

3.3 Aharonov-Bohmov efekt

Pretpostavimo da smo načinili uzorak od zlata u obliku prstena, kao što je prikazano na slici 5 (to je SEM slika jednog takvog stvarnog uzorka). Elektroni ulaze u prsten na jednoj strani prstena (točka X) i izlaze na drugoj strani (točka Y). Na svom putu od X do Y oni mogu izabrati jedan od dva kraka prstena. U točki Y njihovi se valovi zbrajaju.



Slika 5: SEM fotografija tipičnog uzorka za mjerenje Aharonov-Bohmovog efekta. Uzorak je od zlata, debljine je 20 nm, a širina krakova prstena je 90 nm. Vrijednost L_ϕ ovog uzorka na $T=0.3$ K je 3 μm .

Provodnost takvog uzorka proporcionalna je vjerojatnosti da elektroni dođu od točke X do točke Y, koja ovisi o razlici faza dvaju puteva. Stavimo prsten u okomito magnetsko polje, tako da kroz njega prolazi magnetski tok $\phi=BA$. Kao što smo vidjeli, vjerojatnost dolaska u točku Y ima klasični i kvantnomehanički član, pa je provodnost prstena dana s

$$G = G_{kl} + \alpha G_0 \cos(\Delta\phi) = G_{kl} + \alpha G_0 \cos(2\pi \phi/\phi_0).$$

U ovom je izrazu G_{kl} klasična provodnost prstena, α konstanta reda veličine jedan, a G_0 kvant provodnosti. Dakle, mijenjamo li magnetsko polje, provodnost prstena oscilirat će oko G_{kl} s periodom magnetskog toka ϕ_0 i amplitudom oscilacija otprilike G_0 . Ta se pojava naziva *Aharonov-Bohmov efekt*.

Kompletan izraz za Aharonov-Bohmov efekt nešto je kompliciraniji, i pokazuje se da amplituda oscilacija trne s L_ϕ kao $\exp(-C_r / L_\phi)$, gdje je C_r opseg prstena. Iz toga se daje zaključiti da će ako je prsten mnogo veći od L_ϕ amplituda oscilacija biti mala, te same oscilacije zasjenjene klasičnom provodnošću G_{kl} . Opet isti uvjet za opažanje valne prirode elektrona: uzorak mora biti mali!

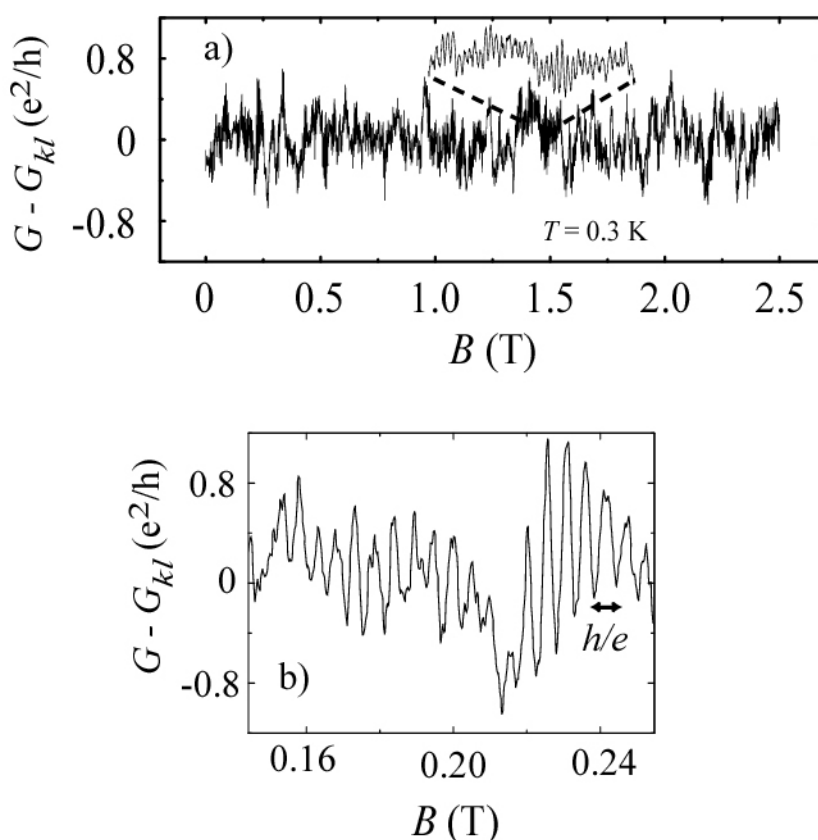
3.4 Univerzalne fluktuacije provodnosti

Aharonov-Bohmov efekt bio je teorijski predviđen još kasnih 50-tih godina (iako je eksperimentalno dokazan znatno kasnije), stoga što ga se može izvesti iz jednostavnih principa kvantne mehanike. U drugoj polovici 80-tih znanstvenu je zajednicu “uzdrimalo” jedno drugo predviđanje, koje ustvari ima istu pozadinu kao Aharonov-Bohmov efekt. Predviđeno je da ćemo iz istih razloga iz kojih opažamo oscilacije provodnosti u malim prstenovima *u svakom uzorku dovoljno malih dimenzija opaziti neperiodičke* (za razliku od Aharonov-Bohmovog efekta) *oscilacije provodnosti*. Te oscilacije nisu posljedica šuma u elektroničkim mjernim instrumentima, već fizikalno svojstvo samih uzoraka. Nadalje, bez obzira na materijal i detalje geometrije uzorka, amplituda tih oscilacija uvijek je reda veličine kvanta provodnosti G_0 . One su stoga univerzalne, pa su dobile naziv *univerzalne fluktuacije provodnosti* (*universal conductance fluctuations*).

Pokusi koji su dokazali ispravnost spomenute hipoteze bili su vrlo brzo načinjeni, a danas su još uvijek izuzetno aktuelni jer su mezoskopske naprave današnjice sofisticiranije nego prije, kad je tehnologija proizvodnje uzoraka bila mnogo manje razvijena. Ta međuigra teorije i pokusa demonstrirala je svu ljepotu mezoskopske fizike: vrlo suptilne teorije postalo je moguće provjeravati relativno jednostavnim pokusima, sve zbog toga što smo naučili praviti male naprave. S tehnološke strane tog napretka stoji činjenica da danas inženjeri koji dizajniraju vrlo napredne, komplicirane strukture u sferi visoke tehnologije mogu principe

rada dijelova svojih uređaja provjeravati u direktnoj suradnji s fundamentalnim znanstvenim istraživanjima. Vjerujem da još od doba otkrića tranzistora ili lasera svijetovi tehnologije i fundamentalnih znanosti nisu surađivali tako blisko.

Pokušajmo razumjeti univerzalne fluktuacije provodnosti na osnovi dosadašnjih razmatranja. Pretpostavimo da elektron od X do Y može doći ogromnim brojem puteva, što je uostalom i stvarna situacija u vodičima proizvoljne geometrije. Parovi takvih puteva zatvaraju krivulje površina S , kojih je vrlo veliki broj. Magnetski tok kroz takve površine je $\phi = BS$, te je razlika faza za parove putanja $\Delta\phi = 2\pi BS / \phi_0$. Zbrojimo li razliku faza preko svih mogućih parova putanja, tj. preko svih mogućih površina koje one zatvaraju (za Aharonov-Bohmov efekt imali smo *samo jednu površinu*, otuda i jednostavan kosinusni član), dobit ćemo kvantni dio provodnosti kao neperiodičnu funkciju magnetskog polja, s amplitudom koja je reda veličine G_0 . Dakle, provodnost *fluktui*ra oko G_{kl} neperiodično i s amplitudom otprilike G_0 .



Slika 6: Rezultat mjerenja provodnosti kao funkcije magnetskog polja za uzorak sa slike 5, na $T=0.3$ K. (a) $G - G_{kl}$ preko širokog raspona magnetskog polja. Neperiodični dio fluktuacija (univerzalne fluktuacije provodnosti) dobro je vidljiv, a primjetite uvećani dio koji pokazuje i periodične fluktuacije (Aharonov-Bohmov efekt). (b) Periodične oscilacije uvećano; period odgovara magnetskom toku h/e .

Pogledajmo sad rezultat jednog pokusa na uzorku prikazanom na slici 5. Mijenjamo li magnetsko polje, primjetiti ćemo da G fluktuiira oko G_{kl} , kao što je prikazano na slici 6a. Pogledamo li te fluktuacije malo bolje, vidjet ćemo da možemo razlučiti dva doprinosa: periodički (dio izdvojen na slici 6a te prikazan uvećano na slici 6b) s periodom h/e , te neperiodički. Prvi je doprinos, naravno, Aharonov-Bohmov efekt. Drugi doprinos predstavlja univerzalne fluktuacije provodnosti, koje se pojavljuju i u prstenu kao i u svakom vodiču malih dimenzija, zbog toga što su krakovi prstena ipak konačne širine, pa postoji čitav niz

mogućih traektorija za elektrone, *kroz pojedini krak*. Dok su točke X i Y za Aharonov - Bohmov efekt definirane na ulazu i izlazu iz prstena, te su točke za univerzalne fluktuacije provodnosti proizvoljne uzduž krakova prstena, pa stoga postoje i različite površine koje zatvaraju elektronske putanje *kroz pojedini krak* (dakle, univerzalne fluktuacije provodnosti događaju se unutar krakova, neovisno o geometriji, te bi ih opazili i kad ne bi imali prsten već samo jedan krak – to jest žicu).

Pokazuje se da je amplituda univerzalnih fluktuacije provodnosti proporcionalna s $(L_\phi/L)^{3/2}$, gdje je L duljina uzorka (u slučaju našeg pokusa duljina jednog kraka prstena). Ako je L_ϕ mnogo manja od L , taj je omjer mali, pa se zbog toga univerzalne fluktuacije provodnosti ne opažaju u uzorcima makroskopskih dimenzija.

4. PERSPEKTIVE

U zaključku bih se htio dotaknuti opće uloge mezoskopske fizike u sadašnjosti i budućnosti znanosti i visoke tehnologije. Materija prezentirana ovdje samo je mali segment mezoskopske fizike, te ustvari pripada njenim ranim danima – iako su mnogi aspekti spomenutih pojava još uvijek otvoreni za istraživanje.

Svijet je u zadnja dva desetljeća otvoren posvemašnjoj minijaturizaciji u tehnologiji. Sve se teži načiniti manjim, ponekad da bi se određeni uređaj mogao prenositi u džepu, a ponekad jer minijaturizacija omogućava superiornije funkcioniranje uređaja – na primjer, gušće pakiranje u računalnom procesoru omogućuje veći broj komponenti na jednom čipu. No, krajnja granica minijaturizacije, tj. 1-10 nm, skoro pa da je već tehnološki ostvarena, te se napredak tehnologije može tražiti *samo u primjeni novih strategija*.

Jedan je primjer *kvantno računalo*. Kvantno računalo kvalitativno je novi koncept, koji s klasičnim računalima na bazi poluvodičke tehnologije ima malo zajedničkog. Ustvari, jedino što ih povezuje je sličnost u binarnoj matematici kao opisu njihova rada – a čak ni tu nema identičnosti (ono što je u klasičnim računalima *bit*, u kvantnim računalima je *qubit*, tj. kvantni bit, koji ima nešto kompliciraniji matematički opis). Kvantno računalo zasad se proučava uglavnom teorijski, a njegova realizacija u stvarnosti predviđa se za 20 –30 godina. No, cijeli se koncept osniva na kvantnomehaničkim svojstvima elektrona i malim napravama – dakle mezoskopskoj fizici! Osnovne karakteristike kvantnog računala su njegova brzina, mnogo veća od one današnjih klasičnih računala, te mogućnost samo-korekcija pogrešaka. Prva eksperimentalna realizacija qubita nedavno je ostvarena u Japanu.

Drugi primjer možemo potražiti u iskorištavanju kompliciranih molekularnih sustava kao dijelova naprava – to je takozvani *pristup samoslaganja (self-assembly approach)*. Naime, mnogi molekularni sustavi, pa i biološki – poput npr. DNK, pokazuju svojstvo da se samoorganiziraju u određene komplicirane strukture. Mi te procese još uvijek ne razumijemo dobro. No, čak i na sadašnjem stupnju razumijevanja tih pojava već i opisno poznavanje rezultata nekog takvog složenog procesa koristi se u pokusima koji se rade u svrsi razvijanja *molekularne elektronike*. Takva bi se elektronika osnivala na korištenju poznatih metoda proizvodnja različitih metalnih, poluvodičkih ili supravodljivih naprava, tj. uređaja poput onih prikazanih u ovom izlaganju, kao “kostura” u koje bi se ugrađivali molekularni sustavi i puštali da se samoorganiziraju. Kakva je budućnost takvog pristupa? Teško je reći, ali činjenica je da naša računala, koja smo mi složili po svojoj volji, doduše rade vrlo brzo ali ne misle – za razliku od mozga, koji je organiziran po nekom nama još uvijek dobrim dijelom nepoznatom principu.

Konačno, gdje je Hrvatska u cijelom tom procesu? Zasad se još nije uključila, kao ni najveći broj zemalja van zapadne Europe, SAD-a i Japana. Jedan je razlog sigurno što su spomenuta istraživanja novijeg datuma, pa treba obrazovati potreban kadar studijskim boravcima u svijetu, za što treba vremena. Važan je također i financijski aspekt, jer

laboratorij(e) za mezoskopsku fiziku treba organizirati kupnjom opreme koja odgovara konkretnim potrebama, što iziskuje određena sredstva (ipak, ne prevelika!). No, nadajmo se da će mezoskopska fizika, te u širem smislu nanoznanost – kao interdisciplinarno područje šireg opsega, uskoro naći svoje mjesto i u Hrvatskoj.

LITERATURA

Umjesto uobičajenog detaljnog navođenja literature, navest ću dva izvora iz kojih čitaoc može naučiti više o prezentiranoj materiji:

1. S. Datta, *Electronic transport in mesoscopic systems*, Cambridge University Press, Cambridge 1995. Prvi sistematski napisan udžbenik iz mezoskopske fizike.
2. <http://www.unibas.ch/phys-meso/> . Grupa mezoskopske fizike na Sveučilištu u Baselu, Švicarska. Odlično mjesto za upoznavanje s mezoskopskom fizikom. Veći broj seminarskih, diplomskih i doktorskih radova u PDF formatu spremno za “download”.