

# Računalniške tehnologije

Vprašanja za ustni izpit (2014)

FRI UNI

Matej Dolenc, 5.6.2014

# 1 Nihanje in valovanje

## **1. Kako opišemo stanje sistema pri nihanju, kako pri valovanju? Kaj je amplituda, (lastna) frekvenca, faza? Kaj je kompleksna amplituda?**

Pri nihanju opišemo stanje sistema z njegovimi merljivimi komponentami, predvsem koordinatami. Pri valovanju pa opišemo stanje z valovno funkcijo, ki ni neposredno merljiva. Bolj formalno: stanje je določeno z vektorjem v Hilbertovem prostoru.

Amplituda – je največji odmik od ravnovesne lege

(Lastna) frekvenca – pove število ponovitev dogodka (npr. nihanje) v neki časovni enoti

Faza – argument sinusne ali kosinusne funkcije, sestavljen iz faznega zamika in krožne frekvence ( $\omega t + \Phi$ )

Kompleksna amplituda -  $A = A_0 e^{i\Phi}$ , povsem opredeljuje gibanje harmonskega oscilatorja z dano frekvenco.  $A_0$  je realna amplituda,  $\Phi$  pa fazni zamik

## **...2. Kaj je posebnost harmonskih nihaj? Zakaj so pomembna? V katerih primerih je nihanje harmonsko?**

Posebnost: Amplituda in frekvenca se s časom ne spreminjata – nihanje je sinusno.

Nihanje je harmonsko, ko je sistem v ravnovesju v točki minimalne energije.

## **3. Ali merilniki merijo amplitudo valovanj ali intenziteto? Kako na to vpliva odzivni čas merilnika?**

Pri počasnih nihanjih lahko gibanje sistema spremljamo iz trenutka v trenutek. To velja splošno: če je odzivni čas merilnika krajši, kot je tipični čas gibanja (perioda), potem lahko časovni potek neposredno opazujemo. V takšnem primeru lahko iz meritve takoj izluščimo amplitudo  $A$ .

Pogosto pa imamo opravka z zelo hitrimi pojavi, ki jim merilnik ne more točno slediti. V takšnih primerih merilniki merijo intenziteto oziroma jakost, to je kvadrat amplitude,  $A^2$ .

Torej: če je odzivni čas krajši kot je tipični čas gibanja merimo amplitudo. Če pa imamo opravka s hitrimi pojavi pa merilnik ne more točno slediti – takrat merimo intenziteto oz. jakost amplitude.

## **4. Kaj so lastni nihajni načini?**

Različni harmoniki – osnovni način, drugi, tretji harmonik (primer struna)

Primer pri struni: valov. Dolžina =  $2l/n$  osnovni način – en hrib  $n=1$ , drugi harmonik  $n=2, \dots$

## 5. Kaj je medij? Kako se širi zvok po zraku?

Medij je snov po katerem se širijo valovanja (npr. zvok po zraku)

Po zraku: Ob širjenju zvoka po zraku se pojavljajo zgoščine plina – zgoščine in razredčine se širijo v prostor. Kjer je zgoščina je zvočni tlak večji od zračnega in obratno.

## ...6. Kako zapišemo valovno enačbo? Kakšne je splošna rešitev za valovanje, ki potuje desno?

$$\Phi''(x) + k^2\Phi(x) = 0 \rightarrow \psi(x,t) = A\sin(kx)\cos(\omega t)$$

Desno:  $\psi(x,t) = f(x-ct)$

## 7. Kaj je ravni val? Kaj je valovna dolžina, valovno število? Kakšna je povezava med hitrostjo, valovno dolžino in frekvenco? Kako merimo valovno dolžino svetlobe?

### SLIKA 10

Ravni val je neskončno dolg val. Igra podobno vlogo kot harmonsko nihanje pri oscilatorjih.

Valovna dolžina – razlika med dvema valovnima hrbtoma

Valovno število – značilnost valovanja, definirar je kot število valovnih dolžin na enoto dolžine oz.  $2\pi/\lambda$

Povezava med hitrostjo, valovno dolžino in frekvenco  $\Rightarrow \text{frek} = \text{hitrost}/\text{valovna dolžina}$

Valovno dolžino svetlobe lahko merimo z uklonsko mrežico.

## 8. Kaj je razlika med ravnim valom in valovnim paketom?

### SLIKA 19

Ravni val je neskončno dolg val, valovni paket pa je prostorsko in časovno omejen sistem valovanja, ki potuje kot enota.

## 9. Kaj je stoječe valovanje? Kaj so osnovna in višje harmonične frekvence?

### SLIKA 11

To je valovanje, ki se na koncu odbije in potuje nazaj (npr. vrv, piščal). Ko se vpadni in odbiti val srečata se seštejeta. Kje se srečata dva hriba ali dve doline se valovanje ojači, kjer se srečata dolina in hrib pa oslabi.

Osnovna frekvenca  $\rightarrow \text{frekv} = cn/2l$ , za  $n=1$ . Za  $n=2,3,\dots$  imamo harmonične frekvence.

## 10. Kakšna je razlika med ravnim valom in stoječim valovanjem? Ali lahko stoječe valovanje dobimo kot linearno superpozicijo dveh ravnih valov?

### SLIKA 13

Ravni val je neskončno dolg val, dovoljeno je poljubno valovno število. Stoječe valovanje pa je omejeno valovanje, na koncu poti se odbije in potuje nazaj. (vrv).

??? Stoječe valovanje lahko dobimo kot linearno superp. Dveh ravnih.

## 11. Kaj je načelo superpozicije? Kdaj velja?

Načelo: le sta  $V_1$  in  $V_2$  rešitvi valovne enačbe, potem je možna rešitev tudi linearna kombinacija s konstantnima koeficientoma  $a$  in  $b$ :

$$\Psi(x,t) = a\psi_1(x,t) + b\psi_2(x,t)$$

Načelo velja splošno za vse linearne sisteme, ki jih opisujejo diferencialne enačbe.

## **12. Kaj je interferenca? Kdaj je konstruktivna, kdaj destruktivna? Kaj so kazalčni diagrami?**

Interferenca je superpozicija dveh ali več koherentnih valovanj – s tem nastane nov valovni vzorec

Konstruktivna: če sta valovanja v enaki fazi in z enako amplitudo

Destruktivna: če sta valovanja v nasprotni fazi

Kazalčni diagrami: s kazalčnimi diagrami lahko sestavljamo valovanja, pri čemer dobimo končno amplitudo kot vektorsko vsoto vseh kompleksnih amplitud v kompleksni ravnini.

## **13. Kaj je ugotovil Young? Kaj je uklonska mrežica?**

Young je ugotovil, da je svetloba valovni pojav.

Uklonska mrežica: to je steklena ploščica z izbrušenimi režami. Razmik med režami mora biti istega velikostnega razreda kot valovna dolžina. Uporabljajo se za natančno merjenje valovne dolžine svetlobe.

## **2 Delci, svetloba, sevanje in interakcije**

### **1. Kaj je snov? Kaj je razlika med elementom, spojino in zmesjo? Kakšen je sodobni koncept atoma? Kaj je molekula?**

Snov lahko definiramo, kot nekaj kar ima maso, zavzema neko prostornino, je otipljivo.

Element: sestavljen iz atomov

Spojina: sestavljene iz elementov

Zmes: sestavljena iz spojin

Sodobni koncept atoma: atoma ne moremo ustvariti, razstaviti ali uničiti, lahko pa jih preuredimo, vsi atomi nekega elementa so enaki, a različni od atoma drugega elementa

Molekula: Del snovi, sestavljena iz najmanj dveh atomov, ki so povezani s kemijskimi vezmi

### **2. Kateri eksperimenti nam pokažejo, da je snov sestavljena iz "nevidnih" delcev, atomov in molekul?**

Eksperiment: Brownovo gibanje, to je gibanje vidnih večjih delcev v tekočini zaradi naključnih trkov z nevidnimi osnovnimi gradniki (atomi, molekule)

### **3. Kako se je pojavil pojem polja? Kako omogoča opisati zakasnitev med vzrokom in posledico v ločenih točkah prostora? Ali polje zares obstaja?**

Najprej se je pojem polja pojavil kot opis delovanja na daljavo med delci snovi.

Prvi delec okoli sebe ustvari polje in na ta način deluje na drugi delec. – ko prvi delec malo premaknemo, se motnja v polju razširi do drugega delca

Polje obstaja povsod v prostoru.

#### **...4. Kaj je dualnost delec-valovanje? Kakšna je tu vloga načela nedoločnosti iz kvantne mehanike?**

Dualnost: Obnašanje elektrona ni lastnost elektrona temveč je odvisna od zunanjih okoliščin (potencial) v katerih se elektron giblje

#### **Kdaj lahko govorimo o trkih? Kdaj o interferenci?**

O trkih lahko govorimo ko je elektron lokaliziran, kar pomeni da valovni paket nosi določeno količino in energijo.

O interferenci govorimo, ko je elektron delokaliziran, takrat položaj elektrona ni določen, je zmazan v prostoru, prav tako je gostota energije zmazana v prostoru.

#### **5. Kaj je standardni model? Kateri osnovni delci obstajajo? Kaj je Higgsov bozon?**

Standardni model je sodobna kvantna teorija polja. Opisuje snov in interakcije z vidika najmanjših gradnikov.

Dva tipa osnovnih delcev:

- fermioni – dva delca ne moreta biti na istem mestu oz. v istem kvantnem stanju (delijo na: kvarki, leptoni(elektron, nevtrino)) in
- bozoni – kvanti interakcije(foton – nosilec elektromag. Interakcije, gluon – nosilci močne interakcije, Z,W – nosilci šibke interakcije, Higgsov bozon).

Higgsov bozon: igra pomembno vlogo v mehanizmu, drugim delcem da maso. Potrditev obstoja 2013, napovedali 50 let nazaj

#### **6. Kaj je razlika med fermioni in bozoni? Kaj je Paulijev izključitveno načelo? Zakaj je pomembno?**

Fermioni – za njih velja paulijevo izključitveno načelo, ne morejo biti v istem kvantnem stanju naenkrat. Imajo polceloštevski spin (0,  $\frac{1}{2}$ , 1,  $\frac{3}{2}$ , ...)

Bozoni – kvanti interakcije, imajo celoštevski spin (0,1,2,...)

Paulijevo izključitveno načelo: dva delca ne moreta biti na istem mestu oz. v istem kvantnem stanju hkrati.

Pomembno je zato, ker razloži zakaj je snov razsežna (zaseda prostor).

#### **7. Kako so sestavljeni nukleoni? Kako je sestavljen atom?**

Sestavljeni so iz treh kvarkov, ki se povezani z močno jedrsko silo

Nukleoni so protoni in nevtroni.

Atom je sestavljen iz jedra(nukleoni) in elektronskih lupin, ki tvorijo oblak okoli jedra.

Velikost: nekaj desetink nanometra.

#### **8. Kaj je svetloba? Kaj so fotoni? Kako se glasi Planckova zveza? Kakšno maso imajo fotoni? Kakšna je njihova gibalna količina? Ali svetloba ustvarja pritisk? Ali fotoni nosijo tudi vrtilno količino?**

Svetloba je elektro –magnetno valovanje, oz. polje fotonov. Fotoni so osnovni delci oz. kvanti elektromagnetnega valovanja – torej bozon. Je nosilec magnetne, električne in statične sile.

Planckova zveza:  $E = h \cdot \nu$ ,  $h$  – planckova konst.

Masa fotona naj bi bila 0.

Gibalna količina  $E = mc^2$ , gib. Kol = 0? Fotoni so nosilci gib. Količine

Svetloba ustvarja pristisk (curek fotonov ustvarja pristisk). To je sila na enoto površine = prejeta gib. Količina na sekundo na enoto površine

Fotoni nosijo tudi vrtilno količino, imajo  $\text{spin} = 1$ .

**9. Zakaj segreta telesa sevajo? Kaj je črno telo? Kaj je dober približek za idealizirano črno telo? Kako približno izgleda spekter? Kaj nam pove Stefan-Boltzmannov zakon? Kako lahko merimo temperaturo brez fizičnega kontakta z merjencem?**

Telesa sevajo zato, ker se ob segrevanju vzbujajo atomi (začnejo migetati). S tem migetajo tudi elektroni notri atomov s tem pa sevajo elektromag. Valovanje.

Črno telo je telo, ki absorbira vso svetlobo, ki pade nanj. Dober približek: majhna odprtina v škatli, katere notranje stene imajo stalno temperaturo.

Spekter ima podana valovanja svetlobe (radijsko, mikrovalovi, infrardečo, vidno, UV, rentgen ter gama žarki)

Stefan Boltzmanov zakon: pove nam jakost izsevane svetlobe črnega telesa:  $j = \gamma \cdot T^4$

Merjenje brez fizičnega kontakta temelji na optičnem pirometru ali s termografijo (medicina, temelji na infrardeči kameri)

**...10. Kaj je fotoefekt? Zakaj je pomemben? Od kod sledi, da je kvantizirana energija posameznih fotonov? Kakšne so posebnosti notranjega fotoefekta v fotodiodah?**

Fotoefekt je pojav, pri katerem svetloba izbija elektrone iz snovi. Uporablja se pri pretvorbi svetlobne energije v električno.

Energija kvantizirana – sledi iz Einsteinovega poskusa, kjer je pomembno da energija fotonov preseže nek prag. ???

Posebnost fotodiod: Skozi prepustno okno lahko osvetlimo stik med polprevodnikoma p in n.

### 3 Osnovni pojmi kvantne mehanike

**1. Kakšna je vloga kvantne teorije v sodobni fiziki? V kolikšni meri je pomembna tudi za fiziko velikih teles? Kaj je korespondenčno načelo? Ali obstajajo makroskopska kvantna stanja?**

Zelo uspešna teorija pojavov na velikostni skali atomov, kjer klasična mehanika povsem odpove. Razloži preidni sistem elementov, pravilno opiše kako se elektroni ujamejo v orbitale okoli jeder atomov.

Fizika velikih teles: raloži razliko med kovinami in izolatorji???

Korespondenčno načelo: načelo po katerem kvantna mehanika pri velikih sistemih preide v klasično mehaniko.

Makroskopska kvantna stanja obstajajo. ???

## **2. Kaj so prostostne stopnje? Kako opišemo sistem klasičnih delcev? Kako opišemo sistem kvantnih delcev? Kako se povečuje kompleksnost opisa s številom delcev v klasični oz. kvantni mehaniki?**

Prostostna stopnja je parametre, ki opredeljuje stanje fizikalnega sistema. Število prost. Stopenj je recimo število koordinat s katerimi opredelimo položaje teles. Če imamo  $N$  teles potrebujemo  $3N$  koordinat. Ločimo zvezne prostostne stopnje (zaloge vrednosti so realna števila) od diskretnih (zaloge vrednosti cela števila).

Sistem klasičnih delcev: stanje sistema opišemo z njegovimi merljivi lastnostmi, predvsem s koordinatami.

Sistem kvantnih delcev: opišemo z valovno funkcijo, ki ni neposredno merljiva. Bolj formalno: stanje je določeno z vektorjem v Hilbertovem prostoru.

Kompleksnot opisa: ???

## **3. Kaj je vektorski prostor? Kaj je Hilbertov prostor? Kaj so verjetnostne amplitude?**

Vektorski prostor je množica vektorjev z dvema praviloma: vektorje lahko seštevamo po komponentah in vektorje lahko pomnožimo s skalarjem  $k$ . To je osnoven pojem linearne algebre.

Hilbertov prostor: je vektorski prostor z definiranim skalarnim produktom. Kvantno stanje je element Hilbertovega prostora.

Verjetnostne amplitude: To sta npr. dva koeficienta  $\alpha$ ,  $\beta$ , ki določata splošno stanje dvonivojskega sistema.  $(100)$

## **4. Kako se opis kvantnih sistemov spremeni, če moramo upoštevati tudi dekoherenco zaradi motenj iz okolice?**

Take sisteme ne moremo povsem opisati z valovno funkcijo, temveč potrebujemo bolj splošen pojem gostotnih matrik. Gost. matrika je hermitska matrika, katere diagonalni elementi določajo verjetnost da sistem najdemo v kvantnem stanju. Če je sistem povsem koherenten pravimo da je sistem v čistem stanju.

## **5. Kaj je dvonivojski sistem? Kakšno je splošno stanje dvonivojskega sistema? Sta verjetnostni amplitudi čisto poljubni?**

To je kvantni sistem z dvema možnima stanjema. Ustrezni hilbertov prostor je dvodimenzionalen.

Splošno stanje zapišemo:  $(100)(101)$

Nista, saj določata stanje sistema. ???

## **6. Ali merljive lastnosti enolično opredeljujejo stanje sistema? Kaj so teorije skritih spremenljivk?**

V klasičnem svetu merljive lastnosti enolično določajo stanje sistema, v kvantnem svetu temu ni tako.

Kvantno stanje naj ne bi bil popoln opis, obstajale naj bi t.i. skrite spremenljivke. Iz tega je sledilo da kvantna mehanika naj ne bi bila popolna, temveč da bi kompletna teorija morala biti deterministična in ne verjetnostna.

## 7. Kaj je spin? Kakšen spin ima elektron? Kaj pa foton? Kako so odkrili spin?

Spin je lastna, notranja vrtilna količina delca, označimo ga z  $S$ . Primer je zemlja, ki se vrti okoli sonca, hkrati pa še okoli lastne osi (lastna vrtilna količina).

Elektron ima spin  $S = \frac{1}{2}$ .

Foton ima spins  $S = 1$

Spin so odkrili z Stern Gerlachovim eksperimentom. Za atom brez magnetnega dipola so pričakovali samo eno piko, saj ne bi bilo odklona. Dejansko so opazili dve ločeni piki in tako odkrili spin elektrona.

## 8. Kako v kvantni mehaniki matematično opišemo opazljive količine? Kakšni morajo biti operatorji, če upoštevamo, da so rezultati meritev realne vrednosti?

Opišemo jih z linearnimi operatorji. Operator  $A$  je ukaz ki vektorju  $\psi$  priredi nek nov vektor  $\Phi \rightarrow$  rečemo tudi preslikava. Operatorji morajo biti linearni.

## 9. Kaj je Bornovo pravilo? Kaj je pričakovana vrednost?

Bornovo pravilo: Pri meritvi opazljivke  $A$  v stanju  $|\psi\rangle$  bomo dobili rezultat  $x_i$  z verjetnostjo  $p_i = |\langle i|\psi\rangle|^2$

Pričakovana vrednost je 0.5 (50% odklon v smer  $+x$ , 50% v  $-x$  smer)

## 10. Kaj je kubit? Koliko realnih količin potrebujemo, da ga povsem opredelimo? Kako označimo stanja na Blochovi sferi?

To je mera za kvantno informacijo. Kubit je količina informacije, ki jo lahko nosi en kvantnomehanski dvonivojski sistem. Kubit lahko obravnavamo kot abstrakten matematični pojem ali kot opis stanja fizikalnega dvonivojskega sistema.

Potrebujemo 2 kompleksni spremenljivki, torej imamo 4 realne količine.

Blochova sfera: stanja prikažemo kot točko na krogelni lupini – sferi.

## ...11. Je rezultat meritev klasična ali kvantna informacija? Opiši meritev za kubit (Stern-Gerlach).

Rezultat meritve je klasična informacija.

???

## 12. Zakaj je branje kvantne informacije destruktivno?

Branje kvantne informacije je destruktivno zato, ker naredimo projekcijo na neko lastno stanje.

## 13. Kaj je Copenhagenska interpretacija? Katere druge se obstajajo? Ali lahko izvemo rezultat meritve, ne da bi meritev zares opravili (Elitzur-Vaidman)?

Po Copenhagenski interpretaciji kvantne mehanike opisuje valovna funkcija verjetnost za dogodka. Ko opravimo meritev, izvemo lastnost, zato negotovosti, ni več in valovna funkcija doživi kolaps v stanje, ki ustreza izmerjeni vrednosti.



Druge interpretacije: interpretacija številnih svetov, po kateri se dejansko zgodijo vse možnosti, vendar se ob vsakem dogodku vesolje razveji glede na različne izide. Rezultata ne moremo izvedeti, ne da bi opravili meritev.

#### **14. Kaj so ključne lastnosti kvantne informacije? Kakšne so posledice za kvantno računanje?**

Ključne lastnosti:

- načelo superpozicije
- branje je destruktivno
- kopiranje ni močno

???

### 4 Kvantno računanje

#### **1. Kaj je kvantno računalništvo? Naštej nekaj najbolj poznanih kvantnih algoritmov? Kako odpravljamo napake med računanjem?**

To je veda o uporabi kvantnih sistemov za obdelavo podatkov. Pri tem je bistveni novi element »skrita informacija« v kvantnih sistemih.

Kvantni algoritmi: razbijanje na prafaktorje (Shor 1994), iskanje po neurejen seznamu (Grover 1995)

Napake odpravljamo s kvantno korekcijo napak. Od klasičnih postopkov se razlikujejo iz dveh razlogov: 1. Prepoved kloniranja kvantne informacije, 2. Drugalne narave napak v kvantnih algoritmihi. Odpravljanje napak je možno le pri zadosti nizki stopnji dekoherence.

#### **2. Kakšno je splošno stanje sistema dveh kubitov? Koliko realnih količin potrebujemo za opis? Je to več kot pri dveh neodvisnih kubitih? Kako narašča velikost Hilbertovega prostora s številom kubitov?**

Splošno stanje je določeno kot linearna kombinacija: (157)

Za opis potrebujemo 6 realnih količin. Za opis dveh popolnoma neodvisnih kubitov potrebujemo le 4 realne količine.

Velikost Hilbertovega prostora z veliko kubitih hitro narašča. Za  $n$  kubitov je dimenzija  $2^n$ .

#### **3. Kaj je kvantna prepletenost? Kaj so Bellova stanja? Kateri eksperiment potrjuje kvantno prepletenost Bellovih stanj?**

Bellovo stanje je stanje nekega dvokubitnega sistema. Pomerimo prvi kubit, če je rezultat 0 bo tudi druga meritev dala rezultat 0. Če je rezultat 1 bo tudi druga meritev dala rezultat 1. Rečemo da je rezultat meritev koreliran.

Kvantna prepletenost je tip superpozicije kvantnih stanj. Vodi k (anti)koreliranim rezultatom meritev. To je ključna lastnost kvantnomehanskih sistemov, ki omogoča kvantno komuniciranje in računanje.

Eksperiment ki to potrjuje je sipanje laserske svetlobe.

#### **4. Kako bi lahko pošiljali podatke s hitrostjo, večjo od svetlobne, če ne bi veljal izrek o prepovedi kloniranja kvantnih stanj?**

Način: Pošiljatelj bi poslal informacijo tako da bi se odločil kako bo pomeril svoj kubit: v bazi s poljem v smeri z ali v bazi s poljem v smeri x. Končno stanje bo odvisno od te izbire. Če ima naslovnik možnost opravljanja le ene meritve bo v obeh primerih dobil 0 ali 1 verjetnostjo 0.5, torej ne izve ničesar. Če bi lahko kubite kopirali bi lahko slučajno razločil po tem, da bi v prvem primeru pri seriji meritev valovne funkcije dobila vedno 0 ali 1, v drugem pa 0 ali 1 z verjetnostjo 0.5. Tako bi lahko poslal en klasični bit informacije.

#### **5. Kakšen pomen imajo unitarne matrike v kvantni mehaniki? Kaj so Paulijeve matrike?**

Unitarne matrike ohranjajo skalarni produkt, kar pomeni da če z njim delujemo na dva vektorja ostane njun skalarni produkt nespremenjen. Unitarne matrike so pomembne zato ker ohranjajo verjetnost.

Paulijeve matrike:  $2 \times 2$  matrike, kompleksno hermitska matrika, predstavljajo generatorje vrtenja.

#### **6. Kaj so kvantna vrata? Katera vrata opisuje matrika X?**

Kvantna vrata so unitarna transformacija, ki vhodnemu stanju priredi izhodno stanje. Matrika X opisuje kvantna vrata NOT. Operator not priredi vektorju  $[A \ B]$  rezultat  $[B \ A]$ .

#### **7. Kako narišemo kvantna vrata? Katera osnovna pravila veljajo?**

Predstavimo jih z diagrami. Črte predstavljajo kubite, čas teče od leve proti desni strani diagrama, eno bitno operacijo označimo s kvadratom o oznako operacije.

Osnovna pravila:

- kvantna vrata so unikatna operacija in so reverzibilna, klasična vrata niso reverz.
- kvantna vezja so nujno aciklična – ne sme biti zank
- en izhod se ne more razcepiti na več vej, ker kloniranje kubitov ni dovoljeno

#### **8. Kako delujejo vrata CNOT? Zakaj so tako pomembna?**

CNOT – nadzorovani NOT. Če je kontrolni kubit  $|0\rangle$  se ciljni kubit ne spremeni. Če pa je kontrolni kubit  $|1\rangle$  se ciljni kubit obrne. (185)

Pomembna so zato, ker se da dokazati da lahko poljubna večkubitna vrata in celo kvantna vezja sestavimo zgolj iz vrat CNOT in različnih enokubitnih vrat. To je nekako kvantni ekvivalent univerzalnih NAND vrat v Boolovi algebri.

#### **9. Zakaj ni možno kopirati kvantne informacije? Katera stanja lahko ločimo z visoko gotovostjo? Ali vrata CNOT omogočajo kopiranje kubitov?**

Kvantne informacije ni možno kopirati ker lahko kloniramo zgolj ortogonalni stanja 0 in 1, ne pa poljubne superpozicije stanj.

Z visoko gotovostjo lahko ločimo ortogonalna stanja.

Vrata CNOT ne omogočajo kopiranja kubitov.

## **10. Kako poteka kvantna teleportacija? Kaj je supergosto kodiranje? Kakšne implikacije imajo ti postopki na kvarnost komuniciranja?**

Pri kvantni teleportaciji lahko prenesmo kvantno stanje na drugo mesto, ne da bi pri tem fizično premaknili sistem v tem stanju.

Supergosto kodiranje imenujemo možnost pošiljanja dveh klasičnih bitov z izmenjavo zgolj enega kubita.

V primeru prestreza kubita se izkaže da se sporočilo ne da razbrati saj bi se potreboval še drugi kubit. Tako je omogočena varna komunikacija.

## **5 Dinamika kvantnih delcev**

### **1. Katera enačba opisuje spreminjanje stanja v kvantni mehaniki? Kako se zapiše? Kaj je hamiltonka?**

Spreminjanje stanja opisuje Schrodingerjeva enačba (197). Igra podobno vlogo kot drugi Newtonov zakon v klasični mehaniki.  $H$  je hermitski operator, ki ustreza celotni energiji sistema.

Hamiltonka je Hamiltonov operator. Njegove lastne vrednosti so energije, ki jih lahko dobimo ob meritvi celotne energije sistema. Najnižja se imenuje energija osnovnega stanja, stanja pri višjih energijah pa so vzburjena stanja.

### **...2. Kaj so stacionarna stanja? Če izmerimo energijo kvantnega sistema, katere vrednosti lahko dobimo?**

To so stanja pri katerih je nek sistem ves čas v istem stanju. Pri teh stanjih globalna faza ni pomembna.

(203)

### **3. Kako se obnaša magnetni moment (spin) v magnetnem polju? Kako lahko to izkoristimo za raziskave zgradbe molekul? Kako pa za kvantno računanje?**

Magnetni moment spreminja stanje – temu pravimo Larmorjeva precesija.

Uporaba v paramagnetni resonanci in jedrski magnetni resonanci.

Za raziskavo zgradbe molekul uporabimo jedrsko magnetno resonanco. Larmorjeva precesija ima majhne popravke zaradi okolice magnetnega jedra, zatlo lahko iz premikov razberemo koristne informacije o strukturi molekule.

???

### **4. Kakšna je valovna dolžina delcev, ki se obnašajo kot valovanje (de Broglie)? V katerem eksperimentu je dobro zaznavna valovna narava elektronov?**

Valovna dolžina je  $\lambda = h/p$ ,  $h$  – planc. Kostnatna,  $p$  – gib. Količina. De Broglie je postavil tezo da se tudi delci snovi obnašajo kot valovanje podobno kot fotoni.

Eksperiment: Davisson – Germerjev eksperiment. Kristal niklja sta obstreljevala z elektroni in opazila uklonski vzorec, podobno kot sipanje rentgenskih žarkov.

**5. Kakšne eksperimentalne dokaze poznamo, da se delci snovi lahko obnašajo tudi kot valovanje? Zakaj se velika telesa ne obnašajo kvantno?**

Davisson – Germerjev eksperiment. Glej prejšnje vprašanje.

Primer – zrno prahu: ne obnaša se kvantno zato ker ni izoliran sistem, se zaletava v molekule plina, absorbira fotone, ... Zaradi ekviparticijskega izreka lahko izračunamo da ima zrno prahu majhno hitrost 1pm/s le pri skrajno nizki temperaturi, v resnici pa ima hitrost nekaj mm/s. Iz tega lahko zaključimo da se delec ne obnaša kvantno.

**6. Kaj opisuje valovna funkcija elektrona? Kako se glasi Schrödingerjeva enačba za valovno funkcijo?**

Valovna funkcija opisuje da nek delec najdemo v neki točki  $r$  v času  $t$ .  $\psi(r,t)$ .

Enačba (227)

**7. Kakšna je rešitev Schrödingerjeve enačbe za prosti delec? Kako pripravimo curek elektronov? Kako ga usmerimo?**

Enačba za prosti delec (240):

Curek pripravimo tako, da kovinsko žličko iz volframa s tokom razžarimo – vroča katoda. Pri visokih temperaturah bodo iz nje izhajali elektroni, ki jih nato usmerimo proti anodi, priključeni na pozitivno napetost. Potrebne so še dodatne elektrode, ki fokusirajo izhodne elektrone v usmerjen curek. – Temu rečemo elektronska puška.

**8. Kako se glasi stacionarna Schrödingerjeva enačba za delec, ujet v potencialu? Kakšne so rešitve za neskončno globoko potencialno jamo? Je energija osnovnega stanja enaka nič?**

Enačba (251):

Rešitve za neskončno globoko potn. Jamo: Če nimamo nobenega podatka je verjetnost da najdemo delec v neki točki konstanta. Delec se bo vedno nahajal v jami, saj je izven jame potencial neskončen in se zato tam ne more nahajati.

Energija osnovnega stanja ni 0, v splošnem je višja od minimuma potencialne energije, kar je posledica načela nedoločenosti. (261)

**9. Kako izgleda (kvalitativno) valovna funkcija za delec v končni potencialni jami? Zakaj lahko elektron najdemo tudi v klasično prepovedanem območju?**

Enačba: (263)

Elektron lahko najdemo tudi v prepovedanem območju zato, ker je to posledica valovne narave delcev. Obstaja optična analogija. Ta pojav omogoča prisluškovanje optičnim komunikacijam, brez da bi bilo potrebno optično vlakno pretrgati.

**10. Zakaj je pomemben model kvantnega harmonskega oscilatorja? Kakšen energijski spekter ima? Koliko vozlov ima valovna funkcija?**

Pomemben je zato, ker ga je predpostavil že Planck ob samem začetku razvoja kvantne teorije. Ključna lastnost je to da so energije v enakomernih presledkih in se olčijo za ravno  $h\nu$ .

Energijski spekter (slika 42)

Koliko vozlov: ??? Toliko kot je ničel na grafu?

**11. Kaj je razlika med diskretnim in zveznim spektrom stanj? Zakaj so diskretni spektri značilni za kvantnomehanske sisteme?**

Diskretni spekter: delec je lokaliziran

Zvezni spekter: delec je delokaliziran, rešitve Shrodingerjeve enačbe tvorijo kontinuum nevezanih stanj (SLIKA 43)

Diskretni spektri so za kvantnomehanske sisteme značilni zato, ker so absorpcijski spektri atomov diskretni.

**12. Se pri potencialnem skoku (padajoči stopnici) odbije kaj valovanja? Zakaj?**

Da, se odbije. Razlog je valovni naravi delcev, zaradi česar je možen odboj tudi v primerih, kjer ga sicer ne bi pričakovali.

**13. Kaj je tunelski pojav? Kako je prepustnost odvisna od debeline plasti? Kje nam tunelski pojav pride prav? Kdaj pa je nezaželen? Ali obstaja podoben pojav v klasični fiziki?**

Tunelski pojav je pojav prodiranja kvantnih delcev skozi klasično prepovedano področje ( $E < V$ ). (SLIKA 46)

Če je plast z  $E < V$  zelo tanka obstaja možnost da delec pride skozi plast in ej transmitivnost od nič različa.

Prav nam pride pri mikroskopiranju (tunelski mikroskop), temelji na kvantnomehanskem tuneliranju elektronov skozi potencialno pregrado.

???

## 6 Kvantna nedoločenost

**1. So poskusi v kvantni mehaniki ponovljivi? Zakaj dobimo različne rezultate, čeprav je valovna funkcija za vsak delec povsem enaka? Kako v praksi izmerimo verjetnostno gostoto elektronov?**

Pri interferenčnem eksperimentu ponovitev poskusa ni možna. Rezultati so različni zato, ker delci, ki letijo iz izvira ne učinkujejo drug na drugega, nitn ne morejo imeti informacije o izidih..

V praksi izmerimo verjetnostno gostoto elektronov tako, da po nekaj časa, ko na detektor pade dovolj delcev v različne tokče izračunamo rezultat Schrodingerjeve enačbe, ki bo nato dala podoben rezultat, kot je bila napovedana verjetnostna gostota.

## **2. Kako opredelimo napake pri meritvah? Kaj so statistične napake? Kaj so sistematične napake?**

Opredelitev: ločimo statistične in sistematične napake.

Statistično napako lahko poljubno zmanjšamo s ponavljanjem meritve. Napaka pada kot  $1/\sqrt{N}$ . Standardni odklon (282) meri razpršenost rezultatov.

Sistematične napake dobivamo pri merjenju, odpravljamo pa jih z boljšimi merilnimi instrumenti, bolj natančnim umerjanjem, iskanjem virov napak,...

## **3. Kaj je uklon? Kako lahko preko pojava destruktivne interference določimo položaj prvega minimuma v uklonski sliki? Kako od tod izluščimo valovno dolžino vpadnega valovanja?**

Uklon je pojav širjenja valov različnih valovnih dolžin v področje sence.  
???

## **4. Kaj je Heisenbergovo načelo nedoločenosti? Kaj nam pove za ravni val? Kako to načelo "izpeljemo" iz rezultatov uklonskih eksperimentov s svetlobo?**

Heisenbergovo načelo nedoločenosti določa kako »optimalen« valovni paket lahko sestavimo v najboljšem primeru. Pove tudi da koncept trajektorije za kvantne delce nima smisla.

Za ravni val pove da, če je gibalna količina dobro določena, potem je lega elektrona popolnoma nedoločena.

Izpeljemo ga iz uklona na reži. Pri prehodu skozi režo letijo elektroni pod kotom glede na njihovo prvotno smer pravokotno na zaslon, kar pomeni da imajo od nič različno komponento gib. Količine. (288,289,290). Produkt nedoločenosti je neodvisen od širine reže in od gibalne količine.

## **5. Kaj je ničelno nihanje? Kakšen je produkt nedoločenosti za kvantni harmonski oscilator v njegovem osnovnem stanju? Kaj pomenita izraza združljivost in komplementarnost?**

Ničelno nihanje je gibanje delca v osnovnem stanju. Primer je delec ujet v potencialni jami, kjer energija osnovnega stanja delca ne more biti 0.

Produkt za kvantni harmonski oscilator v njegovem osnovnem stanju je 0 ??? (299,300) Pol energije v povprečju je v kinetični energiji, pol pa v potencialni.

Združljivost: Ta izraz uporabljamo pri meritvah. Če imata operatorja enaka lastna stanja, potem meritev ene izmed količin ne vpliva na meritev druge. Rečemo da sta meritvi združljivi. Operatorja zato komutirata

Komplementarnost: Če operatorja ne komutirata, potem ustreznih opazljivk ne moremo točno pomeriti. Takrat pravimo da sta opazljivki komplementarni. Primer: operator koordinate  $x$  in operator komponente gibalne količine  $p_x$ . Primer: Tudi paulijeve matrike ne komutirajo.

## **6. Kaj je Bellova neenačba in kakšen pomen ima eksperimentalno dejstvo, da je v kvantnih sistemih prekršena?**

Bellova neenačba temelji na predpostavkah, ki so v skladu z zdravo pametjo, torej našo intuicijo, ki smo jo pridobili v svetu kjer velja Newtonova mehanika.

Meritve, ki jih opravljamo ne morejo vplivati ena na drugo.

Bellova neenačba temelji na dveh predpostavkah:

- Predpostavka realizma, fizikalne lastnosti imajo določeno vrednosti, ki obstajajo neodvisno od meritve
- Meritvi sta si med seboj neodvisni. To je predpostavka lokalnosti.

Skupaj jima rečemo predpostavka lokalnega realizma.

Eksperimentalno dejstvo: Lokalni realizem za naš svet ne obstaja. Ni jasno ali je težava v realizmu ali lokalnosti, gotovo je da vsaj ena izmed teh predpostavk ne velja. Bolj natančno: Bellova neenačba nam pove, da ne more obstajati nobena teorija z lokalnimi skritimi spremenljivkami.

## **7 Elektronska mikroskopija**

### **1. Kaj je uklonska limita? Kolikšna je največja povečava optičnih mikroskopov? Bi kaj pridobili, če bi opazovali z UV svetlobo ali z žarki gama? Ali uklonsko limito prelisčimo?**

(326) – uklonska limita:

Omejeni smo na ločljivost, določena je z valovno dolžino svetlobe.  $n$  je količnik snovi, skozi katero se širi svetloba,  $f$  pa kot pod katerim pada v točko. Uklonska limita je podana z valovno dolžino  $d = \lambda/2$ .

Največja povečava je okrog 1000x, prb. 200 nm.

Če bi opazovali z UV svetlobo, to ne pomaga veliko zaradi močne absorpcije v snovi, pri gama žarkih in rentgenskih pa ni na voljo ustreznih optičnih elementov, s katerimi bi lahko izsotirili žarke.

Ne moremo je prelisčiti (ukl. limite)

### **2. Kako deluje vrstični elektronski mikroskop - SEM? Kako ustvarimo curek elektronov? Kako ga uklanjamo? Katere podatke zajemamo? Kako se končno tvori slika?**

Delovanje: snop elektronov prečesuje površino vrstico za vrstico. Vpadni elektroni imajo visoko energijo, do nekaj 10 keV.

Elektroni nastajajo v elektronski puški, najbolj primerno je da elektroni izhajajo iz neke točke. Pogosto se uporablja top s poljsko emisijo, ki elektrone potegne iz izvira z močnim el. Poljem. Curek elektronov uklanjamo z elektronsko optiko

Zajemamo lahko kemijsko sestavo ali podatke o topografiji.

Sliko pomagajo tvoriti elektroni, nizkoenergijski elektroni imajo relativno kratko povprečno pot v snovi, zato prihaja signal samo iz površine. To je temelj za površinsko občutljivost slikanja. Slike so črno bele.

Slike lahko tvorimo tudi iz povratno sipanih elektronov.

Sliko si pomagamo tvoriti z nanosom tanke prevode plasi, da se vpadni elektroni ne odbijajo  
Povečave: 10x do 500.000x

### **3. Zakaj je vrstična elektronska mikroskopija površinsko občutljiva, čeprav lahko elektroni prodrejo kar globoko v vzorec? Kaj določa ločljivost?**

Občutljiva je zato, ker se na izolatorskih vzorcih v kratkem času nabere električni naboj, ki kvarno vpliva na tvorjenje slike, saj odbija vpadne elektrone.

Ločljivost omejuje velikost pike snopa na površini vzorca.

### **4. Kako deluje presevalni elektronski mikroskop (TEM)? Kako moramo pripraviti vzorec? Kakšno ločljivost lahko dosežemo?**

Pri TEM tanek vzorec preiskujemo s snopom elektronov, ki prodrejo skozi vzorec in se pri tem sipajo. Slikanje je podobno kot pri optičnih mikroskopih, le da za slikanje namesto svetlobe uporabljamo elektrone.

Pripravljen vzorec mora biti zadosti tanek, da lahko elektronski curek prodre skozi njih.

Največja ločljivost, ki jo lahko dosežemo je okoli 50 pm.

### **5. Kaj se zgodi, ko približamo dva kosa snovi na izjemno majhno medsebojno razdaljo? Kakšne atomske sile obstajajo? Kdaj pride do tunelskega pojava?**

Med tema dvema kosoma snovi je plast vakuumu, tako pride do pojava tuneliranja.

???

Do tunelskega pojava pride, ko konico približamo površini na nekaj desetink nanometra, pri čemer se je med vzorcev in konico vakuumsko plast, kar je podobno prehodu kvantnih delcev skozi potencialno plast – tuneliranje.

### **6. Kako deluje vrstični tunelski mikroskop - STM? Zakaj je možno doseči atomsko ločljivost? Kaj vse nam omogoča možnost premikanja posameznih atomov?**

STM deluje: osrednji del mikroskopa je ostra konica, v idealnem primeru zaključena z enim samim atomom. To konico lahko premikamo v vseh treh prostorskih smereh. V praksi prilagajamo višino z konice nad površino. Tako neposredno dobimo informacijo o topografiji površine. Slikanje izvajamo podobno kot pri SEM, vendar počasneje.

Atomsko loč. Je možno doseči zato ker se s konico lahko zelo približamo vzorcu. Konica mora biti kvalitetna. ?

S premikanjem posameznih atomov lahko sestavljamo t.i. kvantne ograde, v aktere ujemamo površinske elektrone, ki nato tvorijo zanimive interferenčne vzorce. Uspele so tudi kemijske reakcije s posameznimi molekulami. IBM je s tem ustvaril napis iz posameznih atomov Xe, na površini Ni.

### **7. Kako deluje mikroskop na atomsko silo - AFM? Kako lahko izmerimo tako šibke sile? Kako lahko s tem mikroskopom razneremo zapis na ploščah trdega diska?**

Za tvorjenje slike meri silo med ostro konico in površino. Konica je pritrdjena v nosilcu, ki se zaradi majhnih sil deformira, deformacije pa zaznavamo preko odoja laserskega žarka.

Te šibke sile izmerimo preko odboja laserskega žarka.

???



## **8. S katerimi mikroskopijskimi tehnikami lahko dobimo informacijo o kemijski sestavi površin? Kako?**

TEM: Informacijo o kemijski sestavi površin lahko dobimo po metodi EDX (Energy-dispersive X-ray spectroscopy). Pri interakciji med visokoenergijskimi elektroni in snovjo nastajajo tudi karakteristični rentgenski žarki. Viskoenergijski vpadni elektroni namreč izbijajo močno vezane elektrone iz notranjih lupin atomov, atomi pa se potem vrnejo v osnovno energijsko stanje tako, da elektroni iz zunanjih lupin zapolnjujejo prazne nivoje v notranjih. Razliko energij atom odda v obliki fotonov. Ker so energije lupin različne za različne vrste atomov, dobimo tako podatek o kemijski sestavi površine.

Kemijsko sestavo dobimo tudi s povratno sipanimi elektroni.

SEM: Tudi s SEM mikroskopi lahko dobimo kemijsko sestavo. SEM bere površino vrstico po vrstico. Glede na delce ki jih zaznavamo lahko sliko ustavrjamo na različne načine – tudi tako da dobimo kemijsko sestavo.

## **8 Elektroni v snovi**

### **1. Na katerih predpostavkah temelji Bohrov model atoma vodika? Kaj napoveduje pravilno? Kje odpove?**

Temelji na predpostavkah stare kvantne teorije. Model temelji na opisu gibanja s trajektorijami, gre za semiklasičen model. Bohrov model ima veliko težav, vendar pravilno opisuje nekatere pojave, denimo valovne dolžine spektralnih črt, izračun ionizacijske energije vodika in radij atoma.

Odpove pri osnovnih pravilih kvantne mehanike.

### **2. Zakaj pride do kvantizacije v Bohrovem modelu atoma? Kaj pomeni, da je to semiklasični model?**

Do kvantizacije pride zaradi pojava različnih orbit pri kroženju. Označimo jih s kvantnim številom  $n$ .

Semiklasični model: To pomeni da model temelji na opisu gibanja s trajektorijami, kar ni združljivo z osnovnimi pravili kvantne mehanike.

### **3. S katerimi kvantni števili označimo orbitale elektronov v sodobni teoriji atoma? Kaj je njihov fizikalni pomen? Kaj so krogelne funkcije?**

S kvantnimi števili  $n$ ,  $l$  in  $m$ .

$l$  – tirno kvantno število

$m$  – magnetno kvantno število

$n$  – glavno kvantno število,  $l$  – osnovno stanje,  $n=2,3,4\dots$  vzbujena stanja

Krogelne funkcije so faktor, ki opisujejo kotno odvisnost. Določena je z azimutom  $\Phi$  in polarnim kotom  $\theta$ .

**4. Kako v kvantni mehaniki opišemo vrtilno količino? Ali lahko hkrati pomerimo več komponent vektorja vrtilne količine? Kako sta povezana vrtilna količina in spinski operator?**

Vrtilno količino definiramo kot vektorski produkt  $\mathbf{r} \times \mathbf{p}$ .  $\mathbf{p}$  je operator gibalne količine. Hkrati lahko pomerimo več komponent vektorja vrtilne količine, saj med seboj ne komutirajo. ???

**5. Kaj je sredica atoma? Kaj je elektronska ovojnica? Kaj so lupine in podlupine? Kaj so spektroskopske oznake?**

Sredica atoma so elektroni v notranjih podlupinah atoma, ki so močno vezani in tvorijo sredico.

Elektr. Ovojnica: Obdaja jedro, na ovojnici se nahajajo elektroni

Lupina je skupina nivojem z istim številom  $n$ , podlupine pa so skupine nivojem z istima številoma  $n$  in  $l$ .

Spektroskopske oznake so zapis ki se uveljavlja v kemiji, recimo če je kvantno število  $n = 1$  je to oznaka K,  $n=2 \rightarrow L$ ,  $n=3$  je M,  $n=4$  je N

**6. Zakaj se lastnosti elementov (približno) ponavljajo periodično?**

Lastnosti se ponavljajo periodično zato, ker imajo podobno konfiguracijo valenčnih elektronov. Takšni sorodni elementi tvorijo skupine. To je razlog da se lastnosti elementov z naraščajočim vrstnim številom spreminjajo približno periodično in jih zato lahko uvrstimo v periodni sistem elementov.

Skupine tvorijo stolpce periodnega sistema.

**7. Kdaj lahko govorimo o molekuli? Katere razlike obstajajo med ionsko in kovalentno kemijsko vezjo? Katere druge vrste kemijskih vezi obstajajo?**

O molekuli je smiselno govoriti le, če je vezavna energija zadosti velika; če ni molekula takoj po nastanku razpade.

Ionska vez: nastane zaradi elektrostatskega privlaka med nasprotno nabitima ionoma (primer: kation in anion – NaCl).

Kovalentna vez: nastane, ko si dva atoma delita par elektronov v območju med atomoma.

Takšne vezi rišemo z dvojnimi pikami ali s črticami. Primer je  $H_2$ .

Obstaja tudi kovinska vez, peptidna vez, vodikova vez.

**8. Kako lahko z računalniškimi simulacijami napovedujemo lastnosti molekul in kristalov?**

**9. Kaj je kristal? Kako vemo, da so elektroni v kristalih periodično urejeni? Kakšne snovi poznamo poleg kristalov? Kaj so kvazikristali?**

Kristal je urejena tridimenzionalna preiodična razporeditev atomov. Nastane, ker ima snov pri takšni razporeditvi atomov minimalno energijo.

Da to lahko vemo, je dokaz uklon rentgenskih žarkov.

Če snov ni urejena ji pravimo amorfna snov (steklo).

Kvazikristal je neperiodičen kristal, značilno za njih je da imajo nekristalogramne sučne osi. Nekateri imajo posebne magnetne, električne in mehanske lastnosti. Prvi kvazikristal je bil hitro strjena zlitina Al-Mn.

### **10. Kako opišemo kristalno mrežo? Kaj je Bravaisova mreža? Kaj je recipročni prostor? Kaj je Brillouinova cona?**

Kristalna mreža je podana z osnovno mrežo in skupino atomov, ki jih pripnemo v vsako točko osnovne mreže.

Bravaisova mreža je osnovna mreža, ki jo opišemo s tremi osnovnimi vektorji, imenujemo jih tudi kristalne osi. Vse točke osnovne mreže dobimo kot linearno kombinacijo  $R = u_1a_1 + u_2a_2 + u_3a_3$ ; pri čemer so  $u_1, u_2, u_3$  poljubna cela števila. To je Bravaisova mreža.

Recipročni prostor: mreža je rešitev obravnave ravnega vala v neskončno velikem kristalu. Ravninski val naj ima enako prostorsko periodo kot Bravaisova mreža. Ta mreža je v recipročnem prostoru.

Brillouinova cona: to je množica točk v recipročnem prostoru, ki so bližje izhodišču kot katerikoli drugi točki recipročne mreže.

Brill. Cona in rec. Prostor sta ključnega pomena pri opisu gibanja elektronov v kristalu.

### **11. S kakšnimi poskusi lahko določimo kristalno strukturo? Kako izmerimo razdaljo med kristalnimi ravninami?**

Kristalno strukturo določamo z rentgenskim sipanjem ali z uklonom elektronov (TEM) ali nevtronov. Strukturo površin pa določamo na ravni posameznih atomov s STM.

Razdaljo lahko merimo pri sipanju na ravninah, kjer pride do uklonskih pojavov oz. do močne ojačitve v točno določenih smereh. Pogoji za ojačitev dobimo iz zahteve, da je razlika poti za dve sosedni vzporedni kristalni ravnini enaka celoštevilskemu večkratniku valovnih dolžin.  $n\lambda = 2d \sin \theta$ ; kjer je  $d$  razdalja med ravninami.

### **12. Kako gojimo velike kristale? Kako se izdelujejo Si waferji?**

V začetni kristal vgrajujemo nove atome. Čisto izhodiščno snov raztalimo in to raztalino namočimo v začetni kristal, ki je pritrdjen na palico. Palico vlečemo iz taline in pri tem vrtilimo. Tako zrastejo veliki kristali v obliki palic.

Si waferje izdelujemo tako, da se palice razrežejo na tanke rezine (waferje) in se nato spolirajo do viokega sijaja.

### **13. Kaj je elektronski pas? V čem se razlikujejo kovine in izolatorji? Kakšna je povezana med atomskimi orbitalami in pasovi? Kako izmerimo pasovno strukturo nekega materiala?**

Elektronski pas je kontinuum stanj, kjer so razmiki med stanji zelo zelo majhni. Atomske stanje se razcepi v  $N$  stanj. Pas opišemo tako, da opredelimo med katerima energijskima stanjema se razteza.

Kovine in izolatorji: razlika v prevodnosti. Če se valenčni in prevodniški pas prekrivata imamo kovino, sicer izolator. Valenčni pas je najvišji zapolnjen pas, najnižji nezapolnjen pa prevodniški pas. Polprevodniki in izolatorji se ločijo po velikosti energijske reže.

???

Pasovno strukturo izmerimo oz. raziščemo z metodo spektroskopije fotoelektronov. Snov obsevamo z elektromagn. Valovanjem.

## 9 Kovine, polprevodniki, izolatorji

### **1. Kaj opisuje model prostih elektronov? Katere snovi dobro opisuje?**

Model prostih elektronov opisuje elektrone kot povsem proste delce, ki ne čutijo nobenega potenciala. Tako jih imenujemo zato, ker zanemarimo podarobnosti o vplivu ionov na gibanje elektronov ter odbojne interakcije med elektroni.

Dobro opisuje kovine.

### **2. Kaj je Fermijeva krogla? Kolikšna je hitrost elektronov na Fermijevi površini?**

Fermijeva krogla je krogla zasedenih stanj, ki jih zasedajo elektroni. V bistvu zapolnjujejo zaporedne krogline lupine.

Hitrost elektronov na Fermijevi površini je (384)

Same hitrosti so ogromne, tudi pri absolutni ničli. Primer baker:  $1,6 \cdot 10^6$ .

### **3. Kaj je Fermi-Diracova porazdelitev? V čem se fermioni razlikujejo od klasičnih delcev? Zakaj dobimo pri meritvah rezultate, kot da bi bilo elektronov za faktor 100 manj, kot bi pričakovali?**

To je porazdelitev fermionov po energijah. (391)

Za fermione velja izključitveno načelo, samo en fermion je lahko naenkrat v enem stanju.

Rezultate manjše za faktor 100 dobimo zato, ker nismo poznali koncepta fermionov in Paulijeve prepovedi.

### **4. Kaj je gostota stanj? Kakšne posebnosti ima gostota stanj v 3D, 2D in 1D snoveh?**

Gostota stanj pove, koliko kvantnih stanj je na razpolago za zapolnitev v nekem majhnem energijskem intervalu.

3D: gostota stanj pove koliko delcev v sistemu ima dano energijo  $E$ . Stanja z dano energijo v prostoru valovnih vektorjeve ležijo v krogelni lupini. Gostota stanj v 3D z energijo korensko narašča.

2D: stanja z enako energijo ležijo na kolobarju. V 2D ni odvisna od energije

1D: stanja ležijo na neki daljici z dolžino  $L$ . Z naraščajočo energijo gostota stanj pada

### **5. Kaj je efektivna masa elektrona? Kako lahko ta koncept uporabimo pri opisu gibanja v snovi, izpostavljeni električnemu ali magnetnemu polju? Kako lahko efektivno maso izmerimo?**

To je masa za opis navidezne mase delcev. Pri tej masi upoštevamo samo zunanje sile.

???

Efektivno maso merimo s ciklotronsko resonanco. Vzorec izpostavimo močnemu magnetnemu polju.

### **6. Kaj je Ohmov zakon? Kako ga lahko zapišemo v lokalni obliki? Kaj je razlika med prevodnostjo in specifično prevodnostjo?**

Ohmov zakon:  $U = RI$ . Električni tok skozi vodnik je premo sorazmeren z napetostjo.

Lokalna oblika:  $j = \sigma E$ . Električni tok nastane kot posledica električnega polja, ki deluje na elektrone, spec. Električna prevodnost  $\sigma$  pa meri jakost odziva na polje.

Prevodnost: Pove lastnost naprave.

Spec. Prevodnost: To je obratna vrednost specifične upornosti.  $\sigma = 1/\zeta$ . Meri jakost odziva na polje. Pove lastnost materiala

### **7. Kako lahko v splošnem zapišemo električni tok? Kaj moramo spremeniti, če nimajo vsi elektroni enake hitrosti?**

Električni tok:  $I = e/t$ , pove količino pretočenega naboja na enoto časa.

???

### **8. Od česa je odvisna specifična prevodnost kovin v Drudejevi teoriji? Kako dolga je tipično povprečna prosta pot?**

Odvisna je od relaksacijskega časa.

Povprečna prosta pot znaša  $l = v_f \cdot T$ , pri čemer je  $v_f$  fermijeva hitrost,  $T$  – relaks. čas.

Primer: povprečna prosta pot je v čistem bakru dolga 39nm.

### **9. Kaj je balistični transport? Kako se glasi Landauerjeva formula? Koliko znaša kvant prevodnosti? Kako izpeljemo Landauerjevo formulo (približno)?**

To je transport, pri katerem se elektron ne sipa na nečistočah, temveč leti nemoteno skozi napravo kot izstrelek.

Landauerjeva formula:  $I = 2e^2TV/h$ . Formula velja pri majhnih temperaturah in napetostih.

Kvant električne prevodnosti  $G$  znaša  $77,5\mu S$ . ( $2e^2/h$ )

Izpeljemo jo iz transmitivnosti in napetostne razlike.

### **10. Katere snovi uvrščamo med polprevodnike? Kateri so najbolj pomembni?**

Med polprevodnike uvrščamo snovi, ki imajo pri absolutni ničli povsem zapolnjen valenčni pas in povsem prazen prevodni pas, med njima pa je energijska reža, ki običajno ni večja od 3eV ali 3eV.

Najbolj pomembni so: Silicij, germanij, Galijev arzenit, nekateri oksidi, plastni materiali,...

### **11. Kaj so glavne prednosti silicija? Kdaj pa uporabljamo GaAs?**

Prednosti silicija: cena, mehanska robustnost materiala, enostavnost obdelave in dobro razvita procesna tehnologija.

GaAs: prednost pred silicijem je večja mobilnost naboja, širša energijska reža. Uporabljamo ga za hitro elektorniko, sončne celice in LED diode z dolgo valovno dolžino (IR)

### **12. Kaj je vrzel? Kakšen naboj ima? Kako se giba?**

Vrzel je manjkajoči elektron, ki se obnaša kot delec. To nastane po prehodu elektrona iz valenčnega v prevodni pas –ostane nezasedeno stanje v valenčnem pasu.

Ima pozitiven električni naboj, zato lahko prenaša električni tok.

Giba se v nasprotni smeri od elektronov, v smeri polja.

**13. Zakaj prevodniški elektron in vrzel v polprevodniku vedno nastaneta v paru? Kaj se zgodi z razliko energij ob rekombinaciji?**

Zato ker elektron preide iz valenčnega pasu, kjer ostane vrzel, sam elektron pa postane prevodniški elektron v prevodnem pasu. Oba sta gibljiva.  
Ob rekombinaciji para oba izgineta.

**14. Od česa je odvisna prevodnost polprevodnikov? Kako lahko vplivamo nanjo?**

Prevodnost je močno odvisna od temperature, ker narašča število termično vzbujenih prostih kvazidelcev, ki omogočajo prevajanje.  
Nanjo lahko vplivamo s sipalnim mehanizmom.

**15. Kako dopiramo polprevodnike? Kaj s tem dosežemo? Kaj je razlika med p in n tipom? Kako je od dopiranja odvisna prevodnost?**

Polprevodnike lahko dopiramo na več načinov:

- substitucijsko dopiranje: dopanti zasedajo mesta, ki bi jih sicer atomi polprevodnika; npr. Silicij dopiramo z arzenom.
  - s pomočjo obstreljevanja substrata z močno pospešenimi ioni -> ionska implantacija
  - z difuzijo dopantov v močno segret substrat -> difuzijsko dopiranje
- S tem dosežemo da prevodnost polprevodnika močno naraste.

Tip n: Uporabljamo petvalentne dopante. Večinski nosilci naboja s elektroni, vrzeli so manjšinske. Atome petvalentnih primesi imenujemo donorji.

Tip p: Uporabljamo trivalentne dopante. Večinski nosilci naboja so pozitivno nabite vrzeli. Trivalentni dopanti se imenujejo akceptorji.  
??? Z dopiranjem se prevodnost poveča.?

**16. Iz katerih razlogov so lahko kristalni materiali izolatorski? Kaj so topološki izolatorji?**

Iz različnih razlogov:

- Iz pasovne teorije: kristalni materiali s sodim številom elektronskih pasov in velikim razmikom med valenčnim iz prevodnim pasom so izolatorji. To so pasovni izolatorji in so najbolj običajna vrsta med snovmi ki tvorijo kristale.
- Mottovi izolatorji: Pri takšnih snoveh lahko pride v odvisnosti od temperature do faznih prehodov med kovinskim (prevodnim) in izolatorskim (neprevodnim) stanjem, v katerih se prevodnost nenadoma spremeni za več velikostnih redov.
- Andersonovi izolatorji: elektroni so ujeti v lokalne energijske minimume in ne morejo potovati po kristalu zaradi porušena ureditve kristalne mreže.
- Dielektrični preboj: atomi se v močnem polju ionizirajo in material nenadoma postane prevoden – najbolj pogost razlog za kvarjenje elektronskih naprav.

Topološki izolatorji: njihova ključna lastnost je ta, da so električni izolatorji znotraj vzorca, na površini pa so prevodni izolatorji. Njihova pasovna struktura je na prvi pogled enaka od tiste pri običajnih pasovnih izolatorjih. Razlika je v tem da na površini obstajajo dodatna stanja katerih energija leži v energijski reži. Ta stanja so zasedena do Fermijevega nivoja, nad njim pa so prazna, podobno kot pri kovinah. Zato so topološki izolatorji prevodni po površini.

## 10 Lastnosti in uporaba polprevodnikov

### **1. Kako se giba elektron v snovi, izpostavljeni zunanjemu magnetnemu polju? Zakaj pride do Hallovega pojava? Kaj lahko merimo z njim?**

Elektroni se gibajo ukrivljeno,

Do Hallovega pojava pride zato ker je polje usmerjeno glede na smer toka, s čimer elektroni čutijo silo, ki je pravokotna na smer toka in na polje.

S Hallovim pojavom lahko merimo napetost. (Hallova napetost)

### **2. Kaj je fotoefekt? Zakaj pride do pojava fotoprevodnosti v polprevodnikih?**

Fotoefekt je pojav, pri katerem s svetlobo izbijamo fotone iz kovine.

Do tega pojava pride zato, ker če ima foton dovolj energije lahko vzbudi elektron iz valenčnega pasu v prevodnega, kjer pride do tvorbe para elektron-vrzel.

### **3. Kaj je spoj p-n? Kaj je zaporna plast? Kako debela je?**

Spoj p-n se pojavi pri diodi, ki ima v eni smeri bistveno večjo električno prevodnost kot v drugi. Na strani n so večinski nosilci naboja elektroni v prevodnem pasu, na strani p pa je elektornov v prevodnem pasu zelo malo.

Zaporna plast je mejno območje v bližini stika p-n, tipično je debela kakšen mikron, odvisna pa je od koncentracije večinskih nosilcev naboja in zaporne napetosti.

### **4. Kaj prikazuje diagram energijskih nivojev za polprevodniške naprave? Zakaj se nivoju ukrivijo, če staknemo območji p in n?**

Prikazuje pasovno strukturo v stiku p-n.

Nivoji se ukrivijo zato, ker nastane prostorski naboj in vgrajeno električno polje.

SLIKA 78

### **5. Zakaj ima polprevodniška dioda usmerniške lastnosti? Kaj se zgodi v primeru obeh polaritet napetosti?**

Da ima dioda usmerniške lastnosti je posledica asimetrije stika p-n.

???

### **6. Na kakšne načine lahko merimo temperaturo?**

Merimo jo lahko:

- s termočleni, kjer izkoristimo spremembo kontaktne napetosti med kovinami v odvisnosti od temperatur na mestu stikov
- uporovni termometri: izkoristimo temperaturno odvisnost upornosti kovin
- termistorji: od uporovnih termometrov se ločijo po uporabi nekovinskih materialov (keramika)

### **7. Na kakšne načine lahko zaznavamo svetlobo?**

Svetlobo lahko merimo s fotodiodami. To so diode, pri katerih lahko skozi prepustno okno osvetlimo stik med polprevodnikoma p in n. Običajno jih priključimo v zaporni smeri in merimo zaporni tok diode. Ta je odvisen od osvetljenosti približno linearno.

## **8. Kako deluje tranzistor na poljski pojav? Kako je sestavljen? Razloži vse črke v imenu MOSFET! Kako nastane invertirana plast?**

Tranzistor je polprevodniška naprava z vsaj tremi priključki, ki lahko ojača in preklaplja električne signale, zato je ključna aktivna komponenta vseh sodobnih elektronskih naprav. Napetost (ali tok) na enem izmed priključkov krmili tok skozi par drugih priključkov. Krmilna napetost (ali tok) je veliko manjša od krmiljene, torej tranzistor deluje kot ojačevalnik.

Sestavljen je iz krmilne elektrode, izvora, ponora, prevodne plasti, izolatorja. Najbolj se uporablja silicij, osrednji del tranz. Je tipa p, izvor ponor sta področji tipa n. Tako dobimo dve zaporedni p-n diodi.

MOSFET:

- M – metal = kovina
- O – oxid
- S – semiconductor (silicij)
- FET – field effect transistor – poljski pojav

Invertirana plast nastane zaradi napetost na krmilni elektrodi.

## **9. Kakšne težave se pojavljajo pri skrajni miniaturizaciji MOSFET in kako jih danes rešujemo? Kateri materiali se uporabljajo? Kaj je MuGFET?**

Pri miniaturizaciji se je nkoč uporabljal SiO<sub>2</sub>, ki pa ni bil primeren zaradi nizke dielektrične konstante, zaradi česar je bilo potrebno stanjšati debelino plasti. Danes INTEL rešuje problem tako da kot dielektrik uporablja t.i. high-k material na osnovi hafnija, verjetno hafnijev silikat.. Kot prevodna plast pa je bil uporabljen aluminij, kasneje pa polikristaliničen silicij, danes pa vse bolj kovine.

MuGFET je MOSFET z večjim številom vrat (multiple gate FET). Danes se že uporabljajo (Intel Ivy Bridge – tri-gate tranzistorji). Omogočajo manjšo porabo energije ter hitrejšo delovanje.

## **10. Kako so izdelana logična vrata v tehnologiji CMOS? Kaj je pomeni pojem komplementarnosti v CMOS? Zakaj se vezja grejejo? Kakšni so trendi na področju CPUjev?**

Logična vrata so sestavljena iz komplementarnega para n in p tranzistorjev.

CMOS – Complementary MOS, logična vrata so sestavljena iz parov p in n kanalnih MOSFET tranzistorjev. Ko je na vhodu napetost, ki ustreza logični 1 je n kanalni tranzistor odprt p pa zaprt -> na izhodu je 0; obratno pa, ko je p kanalni tranzistor na logični 1 je n na 0, in na izhodu je 1, na vhodu pa 0.

Vezja se grejejo zaradi visokih hitrosti preklapljanja, pri čemer je poraba energije zelo visoka. Trendi na področju CPUjev: Danes se izdeluje večjedrne procesorje s čedalje več jedri.

## **11. Kaj pomeni pojem “tehnološkega vozla”? Kaj zares pomeni, da je nek procesor izdelan v “22 nm” tehnologiji? Kaj lahko pričakujemo v prihodnje?**

???

Da je nek procesor izdelan v 22nm tehnologiji pomeni da je to najkrajša možna zareza v silicijevo ploščico.

Naslednik 22nm tehnologije naj bi bil 14nm tehnologija, nato 10, 7, 5nm.



## 11 Heterostrukture, optični elementi in nanonaprave

### **1. Kaj je razlika med homospojem in heterospojem? Kaj so prednosti heterostruktur?**

Heterospoj: stik med različnima polprevodnikoma

Homospoj: Stik med različno dopiranimi območjema istega polprevodnika

Razlika je v tem, da se v heterospoju srečata polprevodnika z različnima energijskim režama in različnima dielektričnima konstantama, kar nudi dodatne možnosti uporabe v elektorniki, kar pri homospojih ni možno.

Heterostrukture so široko rabljene v elektroniki in optiki, dodatne možnosti.

### **2. Kako izdelamo heterostrukture? Kaj je epitaksija? Kdaj je epitaksija močna?**

Heterostrukture gojimo z epitaksijo. Epitaksija je postopek kjer rastejo kristalne plasti ene za drugo, pri čemer se atomi nove plasti pokrivajo z atomi predhodne. Gojenje poteka z izhodiščnim materialom v plinasti ali tekoči fazi ali pa z uporabo molekulskega curka.

Epitaksija je možna le, če imata oba materiala ustrezne fizikalne lastnosti, predvsem podobno mrežno konstanto.

### **3. Zakaj je GaAs tako popularen? V katere namene se ga uporablja?**

Popularen je zato, ker lahko atome Ga nadomestimo z atomi Al, kar omogoča doseči natavljivo energijsko režo.

Uporablja se ga za izdelavo sončnih celic, integriranih vezij, diod,...

### **4. Kaj je kvantna jama? Kvantna žica? Kvantna pika? Kako jih izdelamo: kako dobimo 2D elektronski plin, kako uporabimo elektrode na površini?**

Kvantna jama je sistem, v katerem so nosilci naboja lokalizirani samo v eni smeri, v prečni smeri pa se prosto gibljejo v dvodimenzionalni ravnini. Izdelamo jih kot dvojne heterostrukture, pri katerih je sredinska plast izjemno tanka.

Kvantna žica je naprava, v kateri so nosilci naboja ujeti v dveh dimenzijah in se lahko prito gibajo le vzdolž žice v preostali dimenziji. »Gojimo« jih v zarezah na nagubanih površinah.

Material za izdelavo žice se napreva iz izvorov, podobno kot pri epitaksiji, žice pa nastanejo spontano pod nekimi pogoji – samoorganizacija. Ideja je da ustvarimo pogoje, da se žice ustvarijo same od sebe.

Kvantna pika je polprevodniška naprava, v kateri so nosilci naboja ujeti v vseh treh prostorskih smereh. Izdelamo jih na podoben način kot kvantne žice, dodaten način pa je da v odljikovi nanocevkki z elektrodami elektrostatsko ujamemo naboje.

2D elektronski plin dobimo v kvantni jami z dvojn timerospojem. Elektrode nad površino uporabimo tako da na njih vzpostavimo negativne napetosti, da v območjih tik nad površino dosežemo tilikšen dvig potenciala za elektrone, da so ti od tam izrinjeni in je njihovo gibanje omejeno na ozek trak.

### **5. V čem se HEMT razlikujejo od navadnih MOSFET tranzistorjev?**

HEMT so do 100x hitrejši od MOSFET in omogočajo doseg zelo visokih frekvenc in imajo nizek šum.

## **6. Kaj je kvantni Hallov pojav? Kako je danes definirana upornost?**

To je pojav, ki omogoča določiti izjemno natančen standard za upornost. Upornost je definirana kot količnik el. Napetosti in el. Toka.

## **7. Kaj je grafen? Kakšna je povezava med grafenom in drugimi ogljikovimi (nano)materiali? Kakšne posebne lastnosti ima?**

Grafen je dvodimenzionalna mreža pravilnih šesterokotnikov in je ena izmed pojavnih oblik ogljika.

Grafen je plast, ki, če jih zlagamo skupaj, dobimo grafit. Če pa iz grafena izrežemo ustrezno kombinacijo šesterokotnikov in jo zvijemo v kroglo dobimo fullerene. Če grafen vzdolžno prerežemo in zvijemo pa dobimo nanocevko.

Lastnosti: je močnejši od jekla, hkrati upogljiv. Prozoren za svetlobo, dobro električno in toplotno prevoden, če je dopiran. Je najtanjši znani material in je zelo lahek.

## **8. Kaj so nanocevke? Iz katerih materialov jih lahko naredimo? Kakšne lastnosti imajo? Kdaj imajo kovinske lastnosti, kdaj pa so polprevodniške?**

Nanocevke so podolgovate strukture, nekakšne makromolekule, sestavljene iz atomov ogljika v podobni konfiguraciji kot grafit v grafenu.

Lastnosti: zelo dobro prevajanje toplote, izredne mehanske in električne lastnosti, zelo težko jih je pretrgati zaradi močnih vezi med atomi ogljika.

Kovinske lastnosti imajo ko je  $n = m$ , sicer pa imajo polprevodniške, pri čemer sta števili  $n$  in  $m$  podani kot zavrtost cevke.

## **9. Kako deluje LED dioda? Kaj je svetlobna učinkovitost?**

Elektroni in vrzeli se rekombinirajo, presežek energije pa iz naprave izhaja v obliki fotonov, torej svetlobe.

Svetlobna učinkovitost je razmerje med svetlobnim tokom in električno močjo, ki se troši na svetilu. Meri se v lm/W.

## **10. Kaj je laser? Kako se razlikujeta spontano in stimulirano sevanje? Kaj je inverzija zasedbe?**

Laser je naprava, v kateri se svetloba ojača v procesu imenovanem stimulirano sevanje. To je kvantnomehanski pojav, ki ga je odkril Einstein.

Stimulirano: Če atom interagira s fotonom, katerega razlika energij je enaka razliki energij med vzbujenim in osnovnim stanjem potem lahko sisteme preide v osnovno stanje in pri tem izseva foton.

Spontano: pri tem sevanju atom sam od sebe preide v osnovno stanje in s tem izseva foton.

Inverzija zasedbe: potrebna je ko pride do optičnega ojačanja, pri čemer nastaja veliko fotonov, namesto da bi se že nastali fotoni absorbirali z vzbujanjem atomov iz osnovnega v vzbujeno stanje.

### **11. Kako deluje polprevodniški (diodni) laser? Zakaj so izdelani iz heterostruktur? Kje vse jih uporabljamo?**

Sevanje laserja nastane s stimuliranimi prehodi elektronov z dna prevodnega pasu na akceptorske nivoje v p plasti.

Iz heterostruktur so izdelani zato, ker taki laserji delujejo pri sobnih temperaturah v zveznem načinu.

Uporabljamo pri: toplotna obdelava kovin, varjenje, rezanje, vrtanje, v medicini, vojaška uporaba, forenzika,...

### **12. Kakšna je gostota elektronskih stanj v 3D, 2D, 1D, 0D sistemih? Zakaj je to pomembno za delovanje polprevodniških laserjev?**

SLIKA 89

Stanja se spreminjajo kvantitativno in kvalitativno.

3D: krivulja

2D: stopničasta oblika gostote stanj

1D: oster maksimum na dnu pasu

0D: diskretni nivoji

???

## 12 Nanoelektronika

### **1. Kaj je nanotehnologija? Kaj je nanoelektronika? Kako je z definicijo teh izrazov? Kaj so danes poglavitni "nanotehnološki" izdelki?**

Nanotehnologija je znanost, ki se nanaša na objekte, ki so velikosti največ okrog 100nm. Gre za obravnavno naprav in objektov, ki imajo posebne lastnosti zaradi svoje majhnosti. Pogosto gre za različne kvantizacijske pojave

Nanoelektronika pomeni uporabo nanoskopskih naprav v vlogi elektronskih komponent, kot so na primer diode in tranzistorji.

Bolj stroga definicija je, da gre za naprave atomske in molekulske velikosti.

Uporaba: diode, tranzistorji,...

### **2. Kateri pojmi so pomembni pri obravnavi prevodniških lastnosti nanoskopskih naprav?**

???

### **3. Zakaj velja Landauerjeva enačba tako splošno? Kakšen je vpliv temperature? Kje je upornost?**

??? Ker lahko v limiti velikega števila kanalov iz Landauerjeve enačbe izpeljemo Ohmov zakon.?

Temperatura: vpliv - pri končnih temperaturah so "stopnice" (SLIKA 98) termično zabrisane. Odvisnost oblike stopnice pa je možno izkoristiti za merjenje temperature.

Sorodne naprave imenujemo primarni termometri ker ne potrebujejo kalibracije.

Upornost: upornost nastane v zunanjem makroskopskem kontaktu in sicer zato, ker se energija

elektronov pretvori v toploto daleč stran od aktivnega dela nanonaprave. Pravimo ji kvantizirana kontaktna upornost.

#### **4. Zakaj je prevodnost nanoskopskih naprav kvantizirana? Kaj so kanali?**

Prevodnost je kvantizirana zato, ker je enaka ne glede na dolžino naprave. Prevodnost je skupna lastnost cele nanoskopske naprave.

Kanal - za kanal rečemo da ga imamo takrat, kot obstaja večje število možnih kvantnih stanj v prečni smeri, ki so relevantna za prevajanje toka.

#### **5. Kaj je kvantni točkovni stik? V kakšni zvezi je s kvantnimi pikami?**

Kvantni tičkovni stik je ožina katere efektivna širina se lahko zvezno spreminja z napetostjo na elektrodah na površini naprave.

Kvantna pika je prav tako sestavljena iz izvora in ponora???

#### **6. Zakaj kvantnim pikam rečemo tudi umetni atomi? Kakšne vrste kvantnih pik poznamo?**

Ker lahko s spreminjanjem napetosti na vratih spreminjamo njeno število elektronov, tako kot lahko z obračanjem potenciometra spreminjamo atomu število  $Z$ .

Poznamo:

- polprevodniške kv. pike
- izdelane so lahko tudi iz atomov in molekul, nanokristalov, kovinskih nanodelcev, nanocevk

#### **7. Kaj je enoelektronski tranzistor? Kaj je Coulombska blokada in enoelektronsko tuneliranje?**

Enoelektronski tranzistor (SET - single el. trans.) je naprava, katere ključni sestavni del je kvantna pika, v katero se

ujame manjše število elektronov. (SLIKA 98) Osrednji otoček je priključen na dve elektrodi, izvor in ponor, s katerimi lahko izmenjuje elektrone s tuneliranjem.

Coulombska blokada je pojav, pri katerem so elektroni nabiti in se med seboj odbijajo.

Enoelektronsko tuneliranje je posledica Coulombske blokade. Pojavi se ko želimo v kvantno piko

dodati en elektron, pri čemer nas to ne sme stati dodatne energije.

#### **8. Kako deluje črpalka za posamezne naboje? Kako je sestavljena?**

Delovanje: S spreminjanjem napetosti na vratih dosežemo da elektron iz enega priključka skoči najprej v prvo piko, nato drugo,..., na koncu pa v drugi priključek. Spreminjanje napetosti je izbrano tako, da v vsakem ciklu premaknemo natanko en elektron iz leve v desno elektrodo, kar je mogoče zaradi pojava Coulombske blokade.

Črpalka je sestavljena iz zaporedne vezanih kvantnih pik.

#### **9. Kako izmerimo prevodnost ene molekule?**

Molekule vežemo na elektrode. Ko prideta elektroda in molekula v stik si izmenjata nekaj naboja.

???

## 13 Magnetizem

### **1. Kako vpeljemo pojma gostote in jakosti magnetnega polja? Kako sta določena magnetna sila in magnetni navor? Kaj je permeabilnost? Kaj je magnetizacija?**

Gostota mag. polja B: določimo jo z magnetno silo na ravni vodnik z dolžino  $l$ , po katerem teče električni

tok  $I$ , ki je pravokoten na smer polja.  $F = B \cdot I \cdot l$

Jakost mag. polja H: opredeljuje magnetno polje, odvisna je od lastnosti snovi, v vakuumu je povsem določena

z gostoto mag. polja. Zveza med gostoto in jakostjo:  $B = \mu H$ ,  $\mu$  - indukc. konstanta

Mag. sila in mag. navor: Mag. navor je določen z mag. moemntom in gostoto mag. polja. Mag. sila:  $F = BIl$ .

Permeabilnost: to je snovna konstanta, ki opisuje obnašanje snovi v mag. polju.

Magnetizacija:

### **2. Kaj pomeni pojem spontane ureditve momentov? Kaj so značilnosti feromagnetnih materialov? Kje jih najdemo v računalnikih?**

Spontana ureditev elementov: pomeni da so materiali magnetno urejeni tudi v odsotnosti zunanjega magnetnega polja. Pomeni da vsi amagnetni momenti nekega območja kažejo v isto smer.

Feromagnetni materiali: magnetni so že pri sobni temperaturi, dobro hranijo podatke (varnostne kopije),

uporabljajo se za izdelavo permanentnih magnetov.

V računalnikih jih najdemo kot mehanizem ročice ki premika bralno/pisalno glavo v trdih diskih, podatkovne kasete za hranjenje podatkov (10 let!).

### **3. Kaj je domena? Kaj se dogaja z domenami v zunanjem magnetnem polju?**

Domena je območje, kjer so magnetni momenti urejeni in kažejo v isto smer.

Domene v zunanjem magnetnem polju se ob magnetenju povečujejo.

### **4. Kaj je izmenjalna interakcija? Kaj je magnetna anizotropija?**

Izmenjalna interackija je kvantno mehanski pojav, pri katerem pride do ureditve moemntov znotraj domen.

Pri Magnetni anizotropiji pride do pojava "sklopitev spin-tir", kjer je lastna vrtilna količina elektrona povezana s tirno vrtilno količino, torej gibanjem elektrona.

### **5. Kaj je histerezna zanka? Kako jo lahko preprosto pojasnimo? Zakaj je pojav histereze pomemben za shranjevanje podatkov? Kako magnetno snov razmagnetimo?**

Histerezna zanka je krivulja, ki opiše obnašanje feromagneta v zunanjem polju.

Opisuje obnašanje snovi v izmeničnem zunanjem polju, ko snov zaporedoma magnetimo v eno smer, nato v drugo.

Za hranjenje podatkov je ta pojav ključen zato, ker omogoča hranjenje zaradi obstoja dveh možnih stabilnih smeri magnetizacije.

Snov razmagnetimo tako, da je povprečni magnetni moemnt po vseh domenah enak nič.

## **6. Kaj je spintronika? Kakšne prednosti naj bi prinesla? Kako dosežemo spinsko polarizacijo? Katere obstoječe "spintronske" naprave poznaš?**

Spintronika je uporaba stanjsekga stanja elektronov za shranjevanje in obdelavo podatkov.

Prednost: smer spina se ohranja brez zunanjega napajanja, možnost je tudi spinskih tokov brez disipacije, najbolj pomembno pa je to, da spin nudi dodatno prostostno stopnjo, ki lahko omogoči izdelavno inovativnih naprav.

Spinsko polarizacijo dosežemo z injeciranjem spina, pri čemer lahko naredimo obstojen spoj feromagnet-polprevodnik.

"Spintronske naprave" : naprave, pri katerih naboj ne izgine? - disk?

## **7. Kaj je magnetnoupornost? Zakaj pride do tega pojava?**

Magnetnoupornost je lastnost snovi, da se specifična električna prevodnost spreminja z jakostjo magnetnega polja, ki mu je izpostavljena.

Do tega pojava pride zaradi sklopitve spin-tir.

## **8. Kaj je gigantska magnetnoupornost? Kako izdelamo naprave s to lastnostjo? Kje se uporabljajo?**

To je pojav izjemno visoke magnetnoupornosti v umetno izdelanih heterostrukturah iz zaporednih plasti feromagnetnih in nemagnetnih prevodnih plasti.

Izdelava: Izberemo takšno debelino prevodnih plasti, da imata dve zaporedni magnetni plasti magnetizacijo v obratnih smereh - to izdelujemo z epitaksijo z molekulskim curkom.

Uporablja se pri bralnih glavah sodobnih trdih diskov.

## **9. Kako deluje spinski ventil? Kako spinski tranzistor?**

Spinski ventil: prepušča zgolj elektrone z določeno smerjo spina. Spinsko polarizirane elektrone spustimo skozi feromagnet, prepuščeni bodo le elektroni z določenim spinom. Z drugim feromagnetom analiziramo ali na poti skozi polprevodnik ohranjajo spinsko polarizacijo. To nato primerjamo za dve različni smeri, in če obstaja razlika, potem skozi napravo teče spinsko polariziran tok.

Spinski tranzistor: temelji na uporabi spinskega ventila z območjem, kjer lahko obračamo spin za krmiljenje spinskega toka skozi napravo. Med polarizator in analizator postavimo aktivno območje iz materiala, ki ima močno sklopitev spin-tir. V takšnih materialih je moč vplivati na spin elektrona.

## 14 Hranjenje podatkov

### **1. Kaj je “trohnenje podatkov” (bit rot)? Kako temu kljubujemo?**

Pomeni da nobena obstoječa tehnologija ne omogoča zares poljubno dolgo hranjenje podatkov, nudi pa več let hranjenja.

Temu kljubujemo z rednim osveževanjem in podvajanjem podatkov.

### **2. Kaj je superparamagnetizem in kaj je Neelov relaksacijski čas? Zakaj to predstavlja omejitev za magnetno shranjevanje podatkov?**

Superparamagnetizem pomeni da lahko pri kratkotrajnih meritvah izmerimo močno magnetizacijo, če pa rezultate povprečimo po času, veliko daljšem od relaksacijskega dobimo rezultat nič.

Neelov relaksacijski čas – to je čas v končno velikih sistemih, pri katerem se magnetizacija v magnetnih domenah naključno obrne.

Omejitev predstavlja zato, ker je lahko ta čas za zadosti velike sisteme tako dolg, da je za praktične namene še vedno neskončen.

### **3. Kako so sestavljene magnetne plošče trdih diskov? Katere nove tehnologije za povečevanje gostote zapisa so se pojavile v preteklih letih? Kaj pričakujemo v prihodnje?**

Magnetne plošče so sestavljene iz aluminija ali stekla na katerega se nanese tanka plast (nekaj 10 nm) feromagnetnega materiala za zapis podatkov na obeh straneh plošče. V trdem disku je do 10 takih plošč, običajno 3 ali 4.

Za povečevanje gostote sta se pojavila urejenost magnetizacije v domenah vzporedne ali navpične. Danes prevladuje navpična ureditev, ki dosega večjo gostoto (800Gb/palec proti vzporedni 200Gb/palec).

To mejo se bo lahko premagalo kvečjemu z novimi pristopi zapisovanja. Ena možnost je izbira materialov z večjo magnetno anizotropijo. – magnetno zapisovanje s pomočjo toplote. Druga možnost je da bi bila plošča izdelana z litografijo – zapisovanje na bitno oblikovan nosilec, tretja možnost pa je zmanjševanje razdalje med posameznimi sledmi podatkov.

### **4. Kateri fizikalni pojav izkoriščamo za branje podatkov, shranjenih na trdih diskih? Katere druge senzorje za magnetno polje poznamo?**

Izkoriščamo pojav spinskega ventila.

Drugi senzorji: glava, ki temelji na anizotropni magnetoupornosti, glava, ki temelji na gigantski magnetoupornosti, danes pa največ glava, ki temelji na tunelski magnetoupornosti.

### **...5. Kako deluje tranzistor s plavajočimi vrati v pomnilnikih flash? Zakaj je število pisalnih ciklov omejeno? Kako se povečuje gostota zapisa podatkov in kaj lahko pričakujemo v prihodnje?**

Delovanje: Vrata so povsem izolirana od okolice z oksidno plastjo. Če so vrata nabita potem je težje odpirati prevodni kanal v plasti p z napetostjo na nadzornih vratih. SLIKA 105

Pisalni cikli so omejeni zato, ker pri procesu injiciranja vročih elektronov, pri čemer nabijamo plavajoča vrata z visoko napetostjo, se izolatorska plast pri tem vsakič rahlo poškoduje.

Gostota zapisa se povečuje z zmanjšanje velikosti tranzistorja ???

V prihodnje lahko pričakujemo spreminjanje spinskega stanja nanostrukture – še zelo oddaljeno.

## **6. Kje znotraj optičnega medija so shranjeni podatki? Kateri fizikalni pojav izkoriščamo za branje podatkov, shranjenih na ploščah CD ROM? Kako poteka zapisovanje na CDR in CDRW medije?**

V optičnem mediju so podatki shranjeni na spiralni sledi iz jamic.

Za branje podatkov iz plošč CD-ROM se uporablja vpad svetlobe. Bere se s pomočjo laserskega žarka.

Zapisovanje na CDR in CDRW medije: zelo intenziven laserski žarek zažiga barvilo na ustreznih mestih in ga s tem naredi neprosojnega zato je pri branju na takšnih mestih močno zmanjšanja odbojnost žarka.

## **7. Kako deluje MRAM? Kaj so poglobitve prednosti?**

V MRAM so podatki shranjeni v magnetnih celicah, vsaka celica je sestavljena iz dveh feromagnetnih ploščic, ki skupaj delujeta kot spinski ventil, kar omogoča odčitavanje spravljenega bita z meritvijo upornosti celice. Če sta obe magnetizaciji ploščic enaki bo uporanost manjša – stanje 1, če sta magnet. V različni smeri bo upornost večja – stanje 0. Magnetizacijo ploščic se preklaplja z porabo dveh prekrizanih žic, po katerih se požene tok, ki inducira magnetno polje in povzroči preklap.

Prednosti:

- Osveževanje ni potrebo
- Podatki ostanjeo zapisani tudi ob izgubi napajanja
- Ob pisanju ne prihaja do poškodb celice – »neomejena življ. Doba«
- Hitrejši od DRAM

## **15 Implementacije kvantnih računalnikov**

### **1. Kaj je dekoherenčni čas? Kaj je gostotna matrika? Kaj so čista in mešana stanja?**

Dekoherenčni čas opisuje, kako robusten je sistem proti naključnim motnjam iz okolice.

Gostotna matrika je hermitska matrika, katere diagonalni matrični elementi  $p_{ii} = \langle i | \rho | i \rangle$  določajo verjetnost, da sistem najdemo v kvantnem stanju  $|i\rangle$ .

Čisto stanje: Če je čistem povsem koherenten, lahko gostotno matriko zapišemo z valovno funkcijo kot  $\rho = |\psi\rangle\langle\psi|$ . Pravimo da je sistem v čistem stanju.

Mešano stanje: Če je sistem podvržen dekoherenci pravimo da je v mešanem stanju, ki je statistično povprečje kvantnih stanj in ga zapišemo kot (493)

### **2. Naštej in komentiraj diVincenzove kriterije za skalabilno kvantno računalništvo!**

1. Obstajati morajo dobro definirani kubiti.

2. Začetno stanje je mogoče pripraviti na zanesljiv način. Običajno gre tu za problem hlajenja do zadosti nizkih temperatur, da pristane sistem v svojem osnovnem kvantnomehanskem stanju.

3. Dekoherenca je zadosti nizka. Operacije kvantnih vrat (eno in dvokubitne) lahko opravljamo na zanesljiv in natančen način.

4. Opravimo lahko meritve kvantnega stanja nad izbranimi kubiti. Meritve morajo biti hitre in natančne (v okviru omejitev kvantne mehanike).



5. Sistem je lahko poljubno velik (skalabilnost). To pomeni, da lahko povečujemo dimenzijo Hilbertovega prostora, ne da bi eksponentno narasla zahtevnost (časovna, prostorska, energijska). V najbolj ugodnem primeru bi zahteve naraščale linearno. Tu nastopi ključna razlika med velikostjo Hilbertovega prostora n ločenih dvonivojskih sistemov ( $2^n$ ) in sistema n sklopljenih ( $2^n$ ).

Dodatni zahtevi za kvantne komunikacije sta še

6. Možnost konverzije med lokaliziranimi (stacionarnimi) in potujočimi kubitami.

7. Možnost pošiljanja potujočih kubitov med izbranimi kraji brez napak.

### **3. Opišite, zakaj so napake pri kvantnem računanju bistveno bolj problematične kot pri klasičnem! Opišite, kako lahko na obeh področjih odpravljamo “bit flip” napake? Kaj “phase flip” napake?**

Bolj problematične so zato, ker so napake drugačne narave (poleg diskretnih tudi zvezne), prepovedano je tudi kopiranje informacije. Napake zaznamo lahko tudi le, če opravimo meritve.

Bit flip napake: klasični pristop: bite potrojimo, če pride do napake (vsi trije biti si niso enaki) jo najdemo preprosto. | kvantnomehanski pristop: upoštevati moramo superpozicije stanj. Ločiti moramo med nepokvarjenim stanjem in pokvarjenim stanjem. Popravljanje omogočata dva dodatna kubita in uporaba vrat CNOT.

Phase flip: ???

4. Kako ujamemo nabite delce v elektromagnetno past (lovljenje in hlajenje)? Kaj je fonon? Kako izvedemo SWAP vrata?

Ujamemo jih v elektromagnetni pasti, sestavljeni iz štirih vzporednih elektrod v obliki valja. SLIKA 110.

Ohladimo jih s pomočjo laserskih žarkov izjemno nizkih temperatur. Uporabljamo Dopplejrevo hlajenje z laserskimi žarki.

Fonon: to je gibanje enako kvantno mehanskemu nihalu z neko frekvenco.

SWAP vrata: to je zaporedje treh vrat CNOT. SLIKA 33 Za  $|a,b\rangle$  dobimo po SWAPu  $|b,a\rangle$ .

### **...5. Kako se obnašajo magnetni momenti v zunanjem magnetnem polju? Zakaj so resonančne frekvence odvisne od kemijske okolice momenta? Kako inicializiramo začetno stanje? Kako opravljamo operacije?**

Imajo zelo dolg relaksacijski čas???

Resonančne frekvence so odvisne od kemijske okolice momenta zato, ker imajo jedra atomov različne kemijske okolice.

Začetno stanje inicializiramo težavno, ker so jedrski spini zelo šibko sklopljeni z zunanjim svetom.

Operacije moramo opravljati na kvantnih stanjih, opraviti moramo več zaporednih operacij.

### **6. Kaj so značilne lastnosti superprevodnikov? Kaj je Josephsonov pojav? Kaj so persistentni tokovi? Kako deluje flux qubit na osnovi SQUID?**

Lastnosti: nizke kritične temperature (pod to temperaturo prevodnost pade na 0), njegova permeabilnost je 0, tretja pomembna lastnost pa je obstoj energijske reže za elektronska stanja, kar pomeni da je gostota stanj enaka točno nič v končnem intervalu energij okoli kemijskega potenciala.

Josephsonov pojav: če skupaj spojimo preko tunelskega stika dva superprevodnika, lahko med njima teče električni tok tudi v odsotnosti razlike v napetosti. To je supertok.

Persistenčni tokovi: To so tokovi, ki se nikoli ne ustavijo. Ko je polje malo manjše od mejne vrednosti supertok kompenzira polje in odbimo pretok 0. Ko pa je polje malo večje od mejne vrednosti supertok teče ravno v nasprotni smeri in ojača polje, zato dobimo pretok natančno enega kvanta.

Flux kubit na osnovi SQUID: SQUID je majhen obroček iz superprevodnega materiala mikronske velikosti z dvema Josephsonovima spojem. Slika 114. Izdelamo jih lahko z dobro razvitimi tehnologijami ter jih integriramo v zapletena vezja. Če vzpostavimo majhno magnetno polje pravokotno na ravnino SQUIDA, potem steče superprevodni tok, ki izniči polje, tako da je magnetni pretok skozi obroček enak nič.

## **7. Kaj je kvantno popušcanje (quantum annealing)? So D-Waveovi računalniki pravi kvantni računalniki?**

Kvantno popušcanje: metoda iskanja globalnega minimuma dane objektivne funkcije med danimi kandidati. Uporablja se predvsem v diskretno zastavljenih problemih.

D-Waveovi rač.: To niso pravi kvantni računalniki. Rešujejo lahko le točno določeno nalogo s kvantnim popušcanjem.

## **8. Kako spravimo kubit v kvantnih pikah? Kako opravljamo kvantne operacije? Kako odčitamo rezultat?**

Stanje lahko spravimo z uporabo zadosti močnega magnetnega polja, s katerim določimo smer magnetizacije, če je temperatura zadosti nizka. Druga možnost pa je spinsko odvisno tuneliranje elektronov.

Operacije: enokubitna vrata opravljamo s pulzi lokalnega magnetnega polja, za dvokubitne operacije pa dve sosednji kvantni piki sklopimo preko tunelskega spoja.

Odčitavanje rezultata: možno je optično ali elektronsko. Pri elektronskem se uporabljajo enoelektronski tranzistorji in kvantni točkovni stiki. Spinsko informacijo je potrebno pretvoriti v nabojsko.