



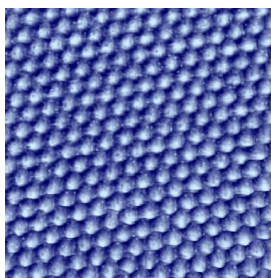
Sild, mis ühendab uurimistööd tänapäeva füüsikas
ja ettevõtlust nanotehnoloogias

Kvantfüüsika

*Tillukeste asjade füüsika, millel on hiiglaslikud
rakendusvõimalused*

2. osa

KVANTOMADUSED JA TEHNOLOOGIA



VIII õppemoodul: Tunneleerumine ja STM



Lifelong
Learning
Programme

Quantum Spin-Offi rahastab Euroopa Liit LLP Comeniuse programmi kaudu.
(540059-LLP-1-2013-1-BE-COMENIUS-CMP)

Renaat Frans, Robert Sum

Kontakt:

renaat.frans@khlim.be

sum@nanosurf.com

TÖLKIJAJA:



See teave kajastab ainult teksti autori seisukohti ning Euroopa Komisjon ei ole vastutav selle informatsiooni kasutamise eest

Sisukord

VIII ÕPPEMOODUL: TUNNELEERUMINE JA STM	104
1 Üle potentsiaalse tõkke ilma vajamineva energiata	104
1.a Klassikalised osakesed ei saa tunneleerida	104
1.b Valgus saab tunneleerida läbi takistuse	104
1.c Tunneleerimine igapäevaelus	106
2 Tunneleerimine: lainete omadus	106
3 Ka elektronid võivad tunneleerida	107
3.a Rakendus: välkmälu	107
3.b Välkmälu seletamine elektronlainete tunneleerimise kaudu	108
3.c Tunneleerimise aluseks olevad protsessid	109
4 Skaneeriv tunnel-elektronmikroskoop (STM)	110
4.a Skaneeriv tunnel-elektronmikroskoop (STM)	110
5 VIII õppemooduli mõisted	115

Autorile viitamine - mitteäriline eesmärk - jagamine samadel tingimustel 4.0 rahvusvaheline (CC BY-NC-SA 4.0)

Kasutamine alljärgnevatel tingimustel:

- Autorile viitamine – peate lisama [kohase viite autorile](#) ja teabe litsentsi kohta ning [välja tooma tehtud võimalikud muudatused](#). Võite seda teha mõistlikul viisil, kuid mitte selliselt, mis annab mõista, et litsentsiandja tõstab teid või teie kasutuse kuidagi esile.
- Mitteäriline eesmärk – te ei tohi kasutada materjali [ärilisel eesmärgil](#).

Võite teha alljärgnevat:

- Jagada – võite materjali kopeerida ning igas vormingus ja iga meediumi kaudu levitada.
- Kohandada – võite materjali segada, muuta ja täiendada.

Litsentsiandja ei saa teile neid õigusi keelata, kui järgite litsentsi tingimusi.

Sellele tööle peate viitama järgmiselt:

Frans R., Sum R. (2015) Quantum SpinOffi õppemoodulid: tunneleerimine ja STM.
Centre for Subject Matter Teaching, KHLim, Diepenbeek, Belgia – Nanosurf AG,
Liestal.



Sissejuhatus 2. osasse: Kvantomadused ja tehnoloogia

Õppemoodulite 2. osas uurime kvantfüüsika rakendamist tehnoloogias. Kasutame esimeses viies õppemoodulis omandatud teadmisi, mõistmaks paljudes tehnoloogilistes uuendustes kasutatavate materjalide kvantomadusi.

Ka 2. osa moodulites käsitleme kõrvuti klassikalise füüsika ja kvantfüüsika mõisteid, et näha, kuidas toimus areng klassikalisest füüsikast kvantfüüsika ja sellega kaasaskäivate tehnoloogiliste edusammudeni. Nagu 1. osas, on ka 2. osa õppemoodulite lõpus toodud harjutuse vormis kokkuvõtte peamistest klassikalise füüsika ja kvantfüüsika mõistetest.

Järgnevalt tutvustame iga õppemooduli sisu, et enne õppemoodulitega töö alustamist anda õpitavast parem ülevaade ja saada selgust, kust alustame ja kuhu välja tahame jõuda.

VI õppemoodul: Fotoefektist digitaalse pildini

Digikaamera tööpõhimõtet uurides saame teada, et digitaalne pilt on võimalik tänu sellisele nähtusele nagu fotoefekt. Kõigepealt käsitleme fotoefekti klassikalise füüsika abil ning seejärel pöördume kvantfüüsika poole. Uurime ka mõningaid tehnoloogilisi rakendusi, mille toimimine põhineb fotoefektil.

VII õppemoodul: Pooljuhid

Selles õppemoodulis alustame elektronide energiatasemetest aatomis ja uurime, mis juhtub, kui palju aatomeid kokku panna. Avastame, et elementide omadused perioodilisustabelis on tingitud nii nende kvantomadustest kui elektrijuhtivusest. Seejärel tutvume tehnoloogiliste rakendustega, mis on tekkinud tänu materjalide vastavate omaduste mõistmisele.

VIII õppemoodul: Tunneleerumine ja STM

VIII õppemoodul tutvustab tunneleerumist ehk tunneliefekti – veel üht kvantfüüsika nähtust. Näeme, et mikroskoopilised kehad ja valgus suudavad läbida energiabarjääri hoolimata sellest, et neil ei jätku selleks piisavalt energiat. Siiski saavad nad seda teha tänu oma dualistlikule (lainelisele-osakeselisele) loomusele. Avastame ka, et tunneliefektil on mitmeid huvitavaid ja kasulikke rakendusi, nagu näiteks väikmälu ja skaneeriv tunnel-elektronmikroskoopia.

IX õppemoodul: Spinn ja selle rakendused

Ainel on palju defineerimata omadusi, mis kehtel lihtsalt on – näiteks mass. Me ei tea tegelikult, mis mass on, aga me teame, kuidas see end ilmutab. See aitab meil tutvustada üht aine kvantomadust – spinni. Klassikalises füüsikas spinnile vastet ei leidu. Saame aga uurida, kuidas spinniga kehad käituvad, et seda paremini mõista ja kasutada tehnoloogilistes rakendustes, nagu näiteks magnetresonantsmograafias (MRT, ingl k *MRI*) ja spintroonikas.

X õppemoodul: Aatomjõumikroskoopia (AFM)

Selles õppemoodulis jätkatakse VIII õppemooduli teemat ja tutvustatakse veel üht tunneliefekti rakendust – aatomjõumikroskoopiat (AFM).

XI õppemoodul: Kvantmehaanikast nanoosakeste ja nende rakendusteni

See õppemoodul viib meid nanoosakeste ja nende omaduste maailma. Nanoosakesed on kvantmehaanilised süsteemid, mis koosnevad paljudest aatomitest või molekulidest – nad erinevad seniõpitatud lihtsatest kvantmehaanilistest süsteemidest. Paljusid nanoosakeste omadusi

saab kasutada nanotehnoloogilistes rakendustes ja nad on praegu väga tugevalt teaduse huviorbiidis.

XII õppemoodul: Mikrobioloogiline kütuselement

Selle õppemooduli teemas kohtub kvantmehaanika bioloogia ja keemiaga. Tutvume selle teemaga lähemalt, uurides mikrobioloogilise kütuselemendi tööpõhimõtet.

VIII õppemoodul: Tunneleerumine ja STM

1 Üle potentsiaalse tõkke ilma vajamineva energiata

1.a Klassikalised osakesed ei saa tunneleerida



(Allikas: Concord.org)

Kui soovid, et pall üle mäekünka veereks, pead andma sellele piisavalt (kineetilist) energiat, et see saaks ületada mäe poolt moodustatava potentsiaalse energia tõkke.

1. Kui sel pole piisavalt energiat, (ei jõua / jõuab) see üle künkatipu.
2. Kui sel on piisavalt energiat, (ei jõua / jõuab) see üle künkatipu.

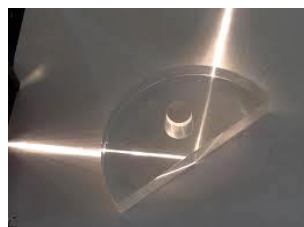
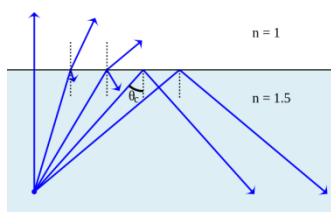
Veider on see, et erinevalt makroskoopilistest pallidest võivad *kvandiosakesed* siiski barjääri ületada, isegi kui neil selleks piisavalt energiat pole. Tegelikult saab kvantfüüsikas ennustada tõenäosust, kas kvant objekti energiabarjäärist läbi tunneleerib, olenevalt osakese energiast ning barjääri kõrgusest ja laiuselt.

1.b Valgus saab tunneleerida läbi takistuse



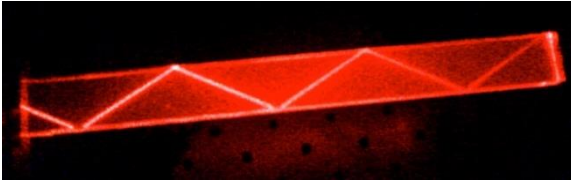
Nagu mäletad, võivad valguskiired, mis liiguvad optiliselt tihedast keskkonnast optiliselt hõredamasse keskkonda, täielikult peegelduda või edasi kanduda. Seda efekti põhjustab valguse muutuv kiirus, mis on tihedas keskkonnas (aeglasem/kiirem) kui hõredas.

Kui langusnurk on suurem kui kindel kriitiline nurk, mis sõltub relatiivsest murdetegurist, peegeldub valgus optiliselt tihedas meediumis täielikult.



(Allikas: Wikipedia avalik domeen)

See muudab võimalikuks valguse püsivuse optilises kius. Seega, kui langusnurk on piisavalt suur, ei saa valgus tihedast meediumist välja tulla.



Kuid tunneleerimise efekt annab nüüd valgusele võimaluse sellest üle saada, et takistust mitte ületada. Saame seda näitlikustada kahe prisma tehtava katse abil. Seda katset saad vaadata siit: <http://www.youtube.com/watch?v=aC-4iSD2aRA>



Frustrated Total Internal Reflection

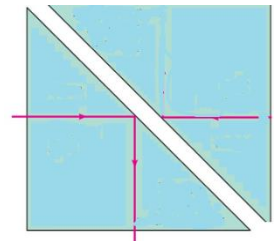
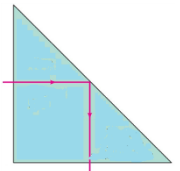
Teisel pool on langusnurk piisavalt suur, et tekiks täielik sisepeegeldus: valgus ei saa keskkonnast lahkuda.

Kuid seejärel läheneme teisele prismale. Kui surume teise prisma esimese prisma vastu (vajaduse korral võid küljed veega märjaks teha), saab valgus kohe prismast lahkuda ja teise prisma liikuda, kuigi klassikalises mõttes on selle lõhe ületamine välistatud.

Klassikaline osake ei või teada, et hoiab teist prisma läheduses. Tänu valguse kvandi laineiseloomele suudab valgus lõhe ületada ning sellest läbi tunneleerida.

Katse: täielik sisepeegeldus valgusega

Näiteks kujutame ette, et prisma ühele küljele paistab laserkiir, nagu on näidatud joonisel.



Katse: täielik sisepeegeldus mikrolainega

Prismadevaheline lõhe peaks olema valguse lainepikkusega vastavuses. Punase valguse puhul on see 600 nm. See tähendab, et kaks prisma peaksid olema üksteisele väga lähedal. Mikrolainete puhul, mille lainepikkused on sentimeetrites, võib näha, et juba paarisenteetrine lõhe on tunneleerimiseks piisav.

Katset mikrolainete tunneleerimise kohta saad vaadata siit: <http://www.sixtysymbols.com/videos/reflection.htm>



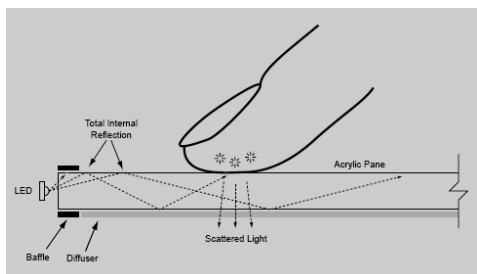
(Allikas: Nottinghami Ülikool)

1.c Tunneleerimine igapäevaelus



Kui hoiad klaasi veega, ei näe sa oma sõrmi, sest vees toimub täielik valguse sisepeegeldus.

Efekt on väga sarnane eespool kirjeldatud katsele prismaga. Kui surud oma sõrmi tugevasti klaasi vastu, muutub sinu naha reljef nähtavaks, sest valgus tunneleerib läbi lõhe. Valgus tunneleerib naha reljefi väga lühikese (õhu) lõhe kaudu, mis sõrmi vastu klaasi pressides formuleerub (allikas: avalik Wikipedia domeen).



Seda tunneleerimise efekti valgusega (täieliku sisepeegelduse murdmine) võib kasutada puutetundliku ekraani tegemisel: valgustundliku elemendi abil saab tuvastada peegelduva valguse ning tuvastada sõrme asukoha ekraanil.

(Allikas: New Yorgi Ülikool: cs.nyu.edu/~jhan/ftirsense/)

2 Tunneleerimine: lainete omadus

Selgitagem nüüd tunneleerimise nähtust.

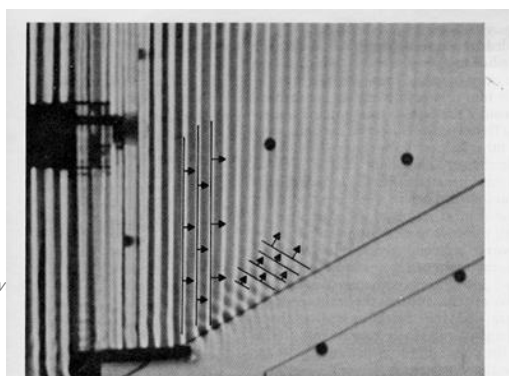
Täielik sisepeegeldus: seletus tunneleerimise kaudu

Kuniks valgus on täielikult klaasis, ei saa valgus teada, mis paikneb klaasi taga. Selle teadasaamiseks peab see läbima lühikese ala, võib-olla paar lainepikkust, keelutsoonis. Kui keelutsooni läbimise alasse paigutatakse teine klaasitükk, saab kiir uuesti ilmuda. Õhulõhe läbimise tõenäosus on seda väiksem, mida paksemaks muutub barjäär.

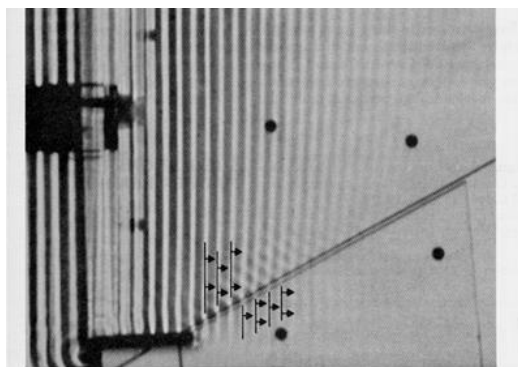
Veelainete tunneleerimine

Täieliku sisepeegelduse tekitab järsk muutatus valguse levimise kiiruses piiri ääres. Näiteks on valguse kiirus klaasis palju (väiksem/suurem) kui õhus.

Veelainete kiirus on samuti sõltuvuses vee sügavusest. Madalas vees on lainete kiirus väiksem, kuid sügavas vees levivad lained kiiremini. Seetõttu näeb ka veelainetega täieliku sisepeegelduse efekti, nagu seda näeb ka valguse puhul.

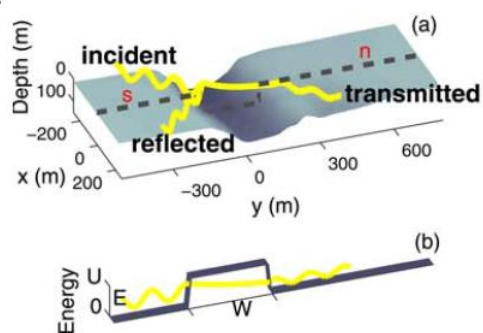


Kaks künkajoont tähistavad tsooni, kus vesi on sügavam. Vasakult tulevaid laineid peegeldatakse selles sügavas tsoonis.



Kui sügava vee loodud lõhe on piisavalt kitsas (vastates lainete enda magnituudile), saavad lained ühtäkki läbi lõhe tunneleerida ning on (osaliselt) üle liikunud.

Allikas: hariduse arendamise keskus, Newton, MA USA



Lainete tunneleerimist võib jälgida ka ookeanilainete puhul merepinnast ülal asuvatel kanjonitel!

Thomson, J., Elgar, S., & Herbers, T. H.C. (2005). Ookeanilainete refleksioon ja tunneleerimine, mida on vaadeldud kanjonis. *Geofüüsikalised uuringud*, 32 (10).

3 Ka elektronid võivad tunneleerida

Kuna teame, et nii valgust kui ka *ainet* iseloomustab laineosakese duaalsus, on tunneleerimine võimalik nii footonite kui ka elektronide puhul.

Just kvantfüüsika seletab elektronide laineiseloomu. Elektronlained võivad tunneleerida läbi klassikalises mõttes läbimatu barjääri.

Kvantfüüsika jaoks on loomulik, et ka elektronid saavad läbi takistuse tunneleerida, kuigi neil pole takistuse ületamiseks piisavalt energiat.

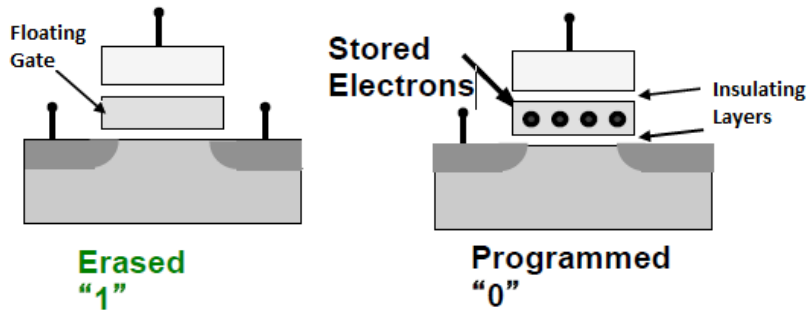
3.a Rakendus: väikmälu

Üks kasulik rakendus, mis põhineb elektronide tunneleerimisel, on väikmälu, mida kasutatakse USB-pulkadel, nutikaartidel ja muul seesugusel. See säilitab andmeid ilma välise energiaallikata.

See põhineb elektronide mälu. Elektronid paiknevad nn ujuvpaisul, mis on isoleerivate oksiidikihtide kaudu *ülejäädud seadmest eraldatud*: **kõik elektronid, mis sinna asetuvad, jäävad sinna kinni ning säilitavad seega informatsiooni.**

Elektronid tunneleeruvad läbi isoleeriva oksiidikihi ning jäävad ujuvpaisule kinni. Pärast tunneleerimist tuleks barjäär teha piisavalt tihke, et neid seal aastaid hoida.

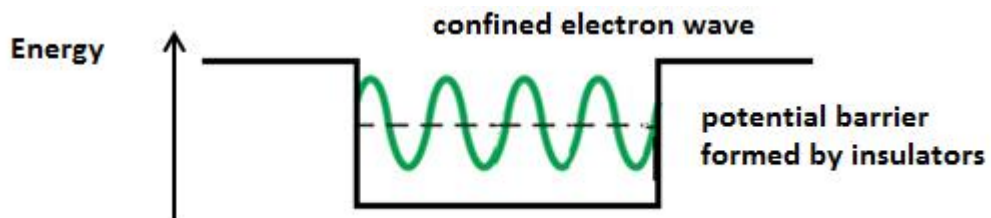
Elektronide tunneleerimine läbi (elektrilise) potentsiaalse barjääri on seletatav elektroni laineomadustega, mis kuuluvad kvantfüüsika eelduste hulka.



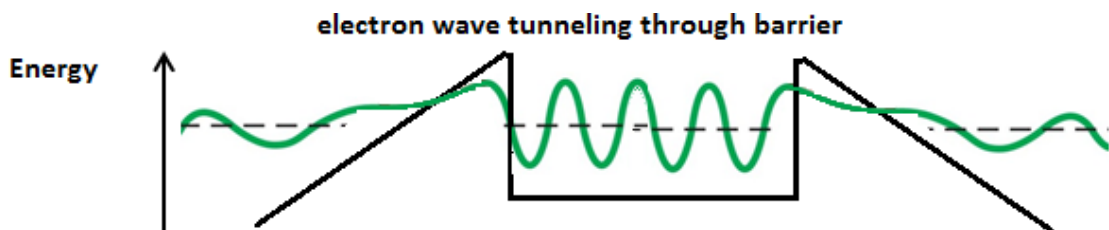
Allikas: Massachusettsi Tehnoloogiainstituut, Open Course Ware

3.b Väikmälu seletamine elektronlainete tunneleerimise kaudu

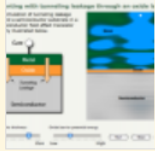
Ümbritsevad isoleerivad kihid vangistavad elektroni energiamahutisse, kus elektron saab olla aastaid, ilma et vajaks välist energiaallikat. Need on alusteadmised mittelenduvast mahutist.



Rakendades värvale elektrivälja, saab potentsiaalsed barjäärid muuta õhemaks, nii et elektron saab värvast välja või taas tagasi tunneleeruda. Tunneleerumine muudab võimalikuks kirjutada värvasse ühtesid või nulle.



Tunneleerumise ja väikmälu toimimise simulatsiooni kohta leiate rohkem õppematerjale veebilehelt concord.org.



Quantum Tunneling
Explore the unique concept of quantum tunneling and its importance to modern technology.

[Quantum Tunneling](#)

Kvandi tunneleerumise simulatsioonid on veebilehel concord.org

3.c Tunneleerimise aluseks olevad protsessid

On üha selgem, et kvandi tunneleerumine mängib tähtsat rolli keemias ja ka elukeskkonna keemias¹. Näiteks fotosünteesi protsessis tunneleeruvad elektronid ühest molekulist teiseni, läbivad membraane ja muud taolist ning võimaldavad seetõttu kiireid energia ülekandmise protsesse. Selles valdkonnas tehtud uurimistöö on avanud palju uusi võimalusi tärkavas kvantbioloogia vallas ning see võib isegi heita valgust sellele, kuidas arendada välja tõhusamaid päikesepaneele.

Samuti sellised protsessid nagu He-osakeste emissioon radioaktiivses alfalagunemises on seletatavad üksnes tunneleerimise kaudu, siinsel juhul tunneleerub He tuum suuremast aatomi tuumast. Radioaktiivsete protsesside stohhastiline iseloom on loomulikult seletatav osakeste kvandi omaduste tagajärjena. Looduse tõenäosuslik iseloom, mida näeb nanotasandil, on seletatav laineosakese dualismiga. Kvantmehaaniliste lainete amplituudid on võrdelised energiakvantide (osakeste) mõõtmise tõenäosusega eri kohtades.

Vooluringides on juhtivad alad, mille moodustavad metallid ning milles elektronid liiguvad, eraldatud isoleerivate kihtidega, milles elektronid on klassikalises mõttes välistatud. Need isoleerivad alad käituvad barjääridena, et elektrone vabastada, nii et nad saaksid liikuda üksnes juhtivates alades. Algelistes vooluringides olid barjäärid väga tihked, muutes elektronide tunneleerimise raskeks. Kui aga barjäärid muutusid õhemaks/paksemaks, muutus ka tunneleerimine tähtsaks ning barjäärid kaotasid osa oma piiravast funktsioonist. See on lahendamist vajav probleem vooluringide edasise väiksemaks muutmise osas. Teisalt annab tunneleerimine uutele rakendustele uusi võimalusi.

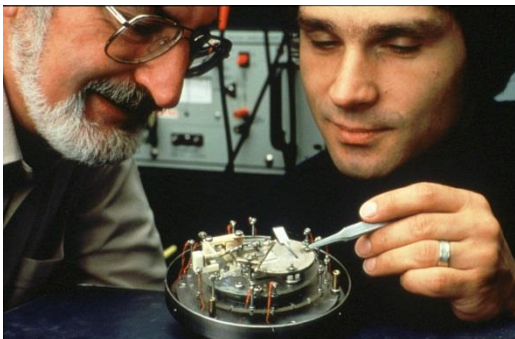
Tegelikult *toimub ajal, mil sa seda lehte loed, triljoneid tunneleerimise juhtumeid nii looduses kui ka tehnoloogias*. Tunneleerimine on looduse uus omadus, mida nanoteadlased ja insenerid püüavad paremini mõista.

Suurepärane rakendus elektronide tunneleerimisele on skaneeriva tunnel-elektronmikroskoobi väljatöötamine: see on seade, mis võimaldab piiluda aatomisse, isegi subatomaarsel tasandil.

¹ Vaata näiteks: Moser, C. C., Keske, J. M., Warncke, K., Farid, R. S., & Dutton, P. L. (1992). Nature of biological electron transfer. *Nature*, 355 (6363), 796–802.

4 Skaneeriv tunnel-elektronmikroskoop (STM)

4.a Skaneeriv tunnel-elektronmikroskoop (STM)



Skaneeriv tunnel-elektronmikroskoop töötati välja 1982. a Šveitsis IBMi laboris Rüşchlikonis. Selle eest anti 1986. a Nobeli preemia. STM muutis esimest korda võimalikuks aatomite „nägemise“ või „skaneerimise“. Vajalikke tehnilisi ja füüsilisi tingimusi arutame allpool.

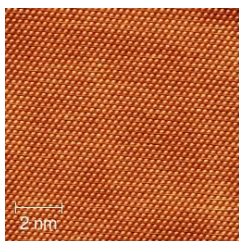
Joonis 1: Heinrich Rohrer ja Gerd Binnig oma esimese skaneeriva tunnel-elektronmikroskoobiga (Allikas: IBM)

Lainete omadusi ära kasutades

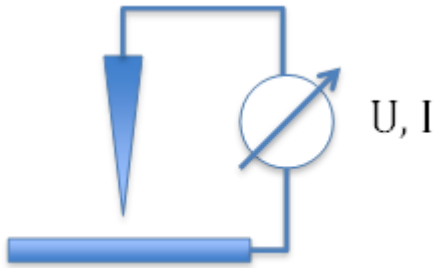
Kvantmehaanika õpetuse kohaselt ei liigu elektronid aatomis nagu väikesed kerad trajektoridel, vaid püsivad veidi laialivalguvalt aladel, mida kutsutakse orbitaalideks (rääkisime neist V õppemooduli lõpus). Seda põhjustavad elektronide laineomadused. Tuuma struktuuris, nt metallis, on väike võimalus, et elektronid paiknevad ka pinnast veidi väljaspool; see on midagi, mis pole klassikalise füüsikaga kooskõlas. Kui liigutada sellele metallile piisavalt lähedal mõõtesondi, on võimalik mõõta nõrka elektrivoolu. Näib, justkui aatomid tunneleeruksid läbi selle lõhe või energiabarjääri. Seetõttu kutsutakse seda efekti tunneleefektiks.



Joonis 2: NanoSurfi skaneeriv tunneleeriv mikroskoop



STM-iga tehtud pilt: hõbeda (Ag(111)) aatomi struktuur. (Allikas: Baseli ülikooli füüsikaosakond)



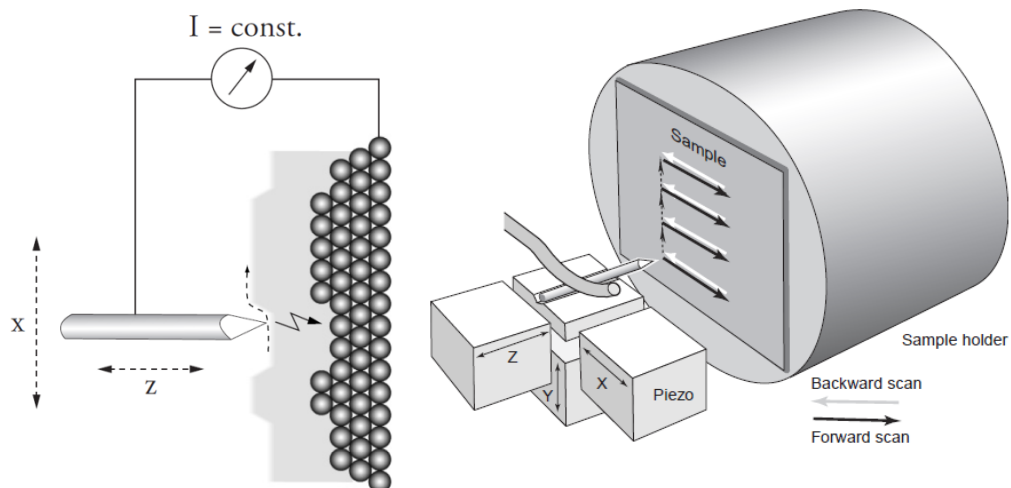
Kuna elektronid asuvad üksnes pinna vahetus läheduses – 1-2 aatomi diameetri kaugusel, tuleb mõõtesondi hoida väga lähedal ja otse pinna juures. Seda teati juba 1950ndatel, kuid polnud selge, kuidas seda tehniliselt teostada. Alles 1982. a rakendasid Gerd Binnig ja Heinrich Rohrer seda seadmel, mida kutsuti skaneerivaks tunnelmikroskoobiks.

Ülesanne 4.1:

Püüa ette kujutada, millised takistused ilmnevad, kui tahta mõõtesondi asetada pinnast aatomi (~ 0.1 nm) kaugusele.

STMi tööpõhimõte:

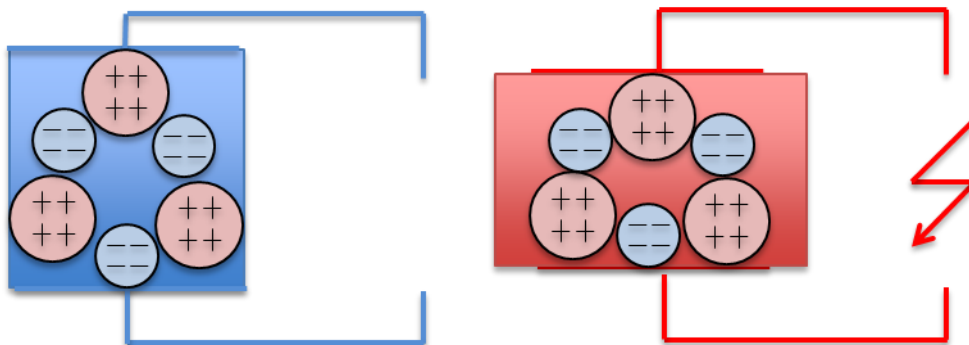
Skaneeriv tunnelmikroskoop põhineb **tunnelvoolu** mõõtmisel proovi pealispinnalt. Kasutatakse plaatina- või volframsondi, mis skaneerib pindu määratletud tunneli voolu juures. Asetusmehhanism paigutab sondi pealispinnale selliselt, et alati mõõdetakse sama voolu. Liigutused² salvestatakse ning need annavad pealispinnast pildi.



Joonis 4: STMi tööpõhimõte

² Mõõtesondi liikumine mööda pinda või vastavate piesoelektriliste käivitajate korrektiivne muutuja x/y teljel (vt joonis 4.1).

Selliste keerukate paigutusülesannete täitmiseks sobivad nn piesoelektrilised kristallid, nt kvarts- või plii-tsirkooniumtitanaadid. Need laienevad elektripinge rakendamisel minimaalselt. Vastupidi, nad toodavad pinget, kui neid kokku surutakse.

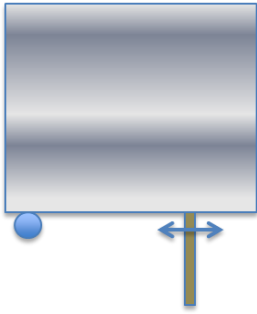


Joonis 4.2: Piesoelektrilise kristalli toimimispõhimõte – need kristallid omandavad kokkupressitult või muul moel deformeeritult laengu. Piesoelektrilist kristalli pigistades genereerime elektrilise pinget ning kui ühendame kristalli kaks tahku voluringiks (parempoolne pilt), saavutame elektrivoolu. Vasakul pildil on näha ümberpööratud protsess: kristall satub deformeerunud olekus mehaanilise pinget alla, kui selle vastastahkudele rakendatakse elektrilist pinget.

Ülesanne 4.2:

Kust me leiame piesoelektrilisi kristalle igapäevaelus?

Järgmine tehniline raskuspunkt STMi konstrueerimisel on sondi paigutus pinna proovi suhtes, et saaks toimuda mõõtmine. Selleks eesmärgiks saab kasutada keerukaid ja täpseid kruvi-mikromeetreid, mis on varustatud samm-mootortäituriga või lihtsate piesoelektriliste sammtäituritega.



Tööpõhimõte on järgmine: silinder on toetatud (sinine) ja piezoelektrilist kristall-lamelli (roheline) saab elektripinget kasutades edasi-tagasi liigutada. Kui lamelli aeglaselt paremale liigutada, saab silinder sellega kaasa liikuda; kui lamelli kiirelt paremale liigutada, ei suuda silinder sellega inertsit tõttu sammu pidada ja jääb maha. Kui seda protsessi korrata, liigub silinder paremale.

Selliste mootorsammudega saavutatakse 50–100 nanomeetrit, mis võimaldab proovi liigutada mõõtesondi kontrollraadiuses.

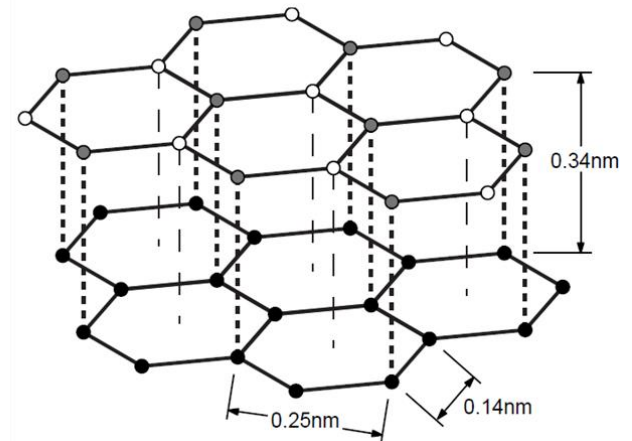
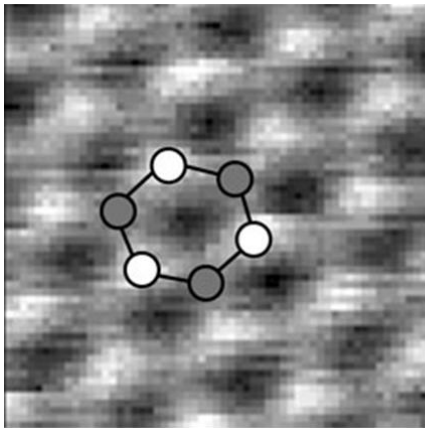
Ülesanne 4.3: temperatuuritundlikkus:

Arvuta, kui palju laieneb silinder ühe kelvini kraadisel kuumusel.

Silindri pikkus 2,5 cm, raua laienemiskoeffitsient: $\alpha = 11,8 \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

Milliseid mõõtmel on vaja, et toiminguid sujuvalt läbi viia?

Skaneeriv tunnelmikroskoop ei mõõda ainuüksi pinna kuju, vaid samal ajal ka elektrijuhtivust proovi pinna lähedal. Kui konkreetses kohas mõõdetakse tugevamat voolu, võib see olla põhjustatud ka sellest, et elektronid on seal aatomitega nõrgemalt seotud kui muudes kohtades. Seda efekti näeb grafiiti mõõtes.

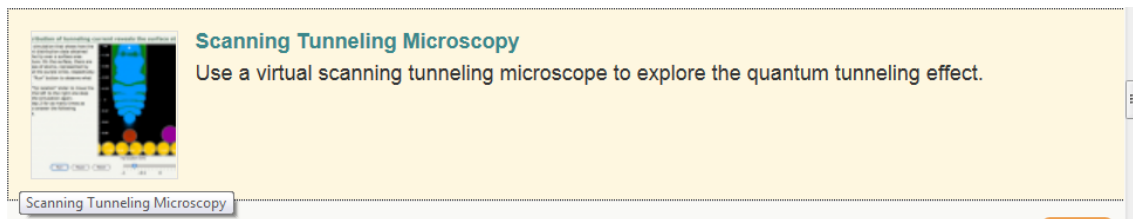


Vasakul näed grafiidi pinna aatomivõre mõõte – siiski ei näe sa võre kuusnurkset struktuuri, mis on tuttav hajutamiskatsetest. Tundub, et näeme STMi pildil üksnes iga teist süsinikaatomit.

Ülesanne 4.4:

Kuidas seletada antud grafiidikihtide struktuuri puhul seda, et ainult iga teine aatom on nähtaval?

Rohkem õppematerjale skaneeriva mikroskoobi kohta leiad veebilehelt concord.org.



STMi simulatsioonid lehel concord.org.

Lahendused:

4.1:

Vibratsioon, soojuspaisumine

4.2:

Piesoelektriline valjuhääldi, võnkuv kvarts kellades ja raadiotes, piesosüütur³

4.3:

$\Delta L \approx \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T = 295 \text{ nm}$. Skaneeriv tunnelmikroskoop mõõdab nanomeetrite raadiuses, kuid paisumine on mitusada nanomeetrit, takistades oluliselt mõõtmist. Kasutusele tuleb võtta meetmed temperatuuri stabiliseerimiseks, nt katte kasutamine õhu liikumise ärahoidmiseks, otsese päikesevalguse vältimine või stabiliseerimiseks piisava aja andmine.

4.4:

Grafiitvõres on kaks eri asetust: hallid aatomid, millel on naaber alumisel võretasandil – nende aatomite elektronid suhtlevad allpool asetseva kihi aatomitega ning on seetõttu tugevamalt ühendatud. Valged aatomid, millel pole naabrit alumisel võretasandil, saavad kergemini elektrone vabastada ning on seetõttu selgemini nähtavad.

³ Piesosüütureid kasutatakse gaasigrillides või välgumihklites.

5 VIII õppemooduli mõisted

Kirjuta lünkadesse puuduvad mõisted!

Klassikalise füüsika mõisted

Makroskoopilised kehad saavad ületada potentsiaalse energia barjääri vaid siis, kui neil on

Täielik valguse sisepeegeldus toimub, kui liiguvad optiliselt keskkonnast optiliselt keskkonda, kui langusnurk on kui kriitiline nurk.

Sama efekt on vaadeldav veelainete puhul, sest veelainete kiirus sõltub vee Kui aga sügava vee loodud lõhe on piisavalt (lainete enda suurusjärgus), saavad lained ühtäkki läbi lõhe tunneleeruda ning on (osaliselt) üle liikunud.

Kvantfüüsika mõisted

Osakesed saavad energiabarjäärist läbi tunneleeruda tänu oma

See on kvantefekt, sest tunneleerumine toimub – igal footonil on laineiseloos.

Tänu oma saavad ka elektronid ja üldse aine tunneleeruda – st nad saavad tunneleeruda läbi energiabarjääri, kuigi neil ei ole barjääri läbimiseks piisavalt energiat.

Kvantosakeste võimalus energiabarjäärist läbi tunneleeruda sõltub osakese ja barjääri