



Sild, mis ühendab uurimistööd tänapäeva füüsikas
ja ettevõtlust nanotehnoloogias

Kvantfüüsika

*Tillukeste asjade füüsika, millel on hiiglaslikud
rakendusvõimalused*



2. osa

KVANTOMADUSED JA TEHNOLOOGIA

IX õppemoodul:

Spinn ja selle rakendused



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

Renaat Frans, Laura Tamassia
Kontakt: renaat.frans@khlm.be

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

TÖLKIJAJA:



Sisukord

2. osa: Kvantomadused ja tehnoloogia

IX ÕPPEMOODUL: SPINN JA SELLE RAKENDUSED	5
1 Materia määratlemata omadused	5
2 Kuidas käitub spinn magnetväljas	6
3 Kvandi veidrused: järjestikused Sterni-Gerlachi katsed	7
4 Rakendus: magnetresonantstomograafia (MRI)	9
5 Rakendusala: spintroonika	11
6 IX õppemooduli mõisted	12

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., Tamassia L., Andreotti E. (2015) Quantum SpinOff Learning Stations. Art of Teaching, UCLL, Diepenbeek, Belgium



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 välgmälu ja skaneeriv tunnel-elektronmikroskoopia.

IX õppemoodul: Spinn ja selle rakendused

Ainel on palju defineerimata omadusi, mis kehadel 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 magnetresonantstomograafias (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 seniõpitud 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.

IX õppemoodul: Spinn ja selle rakendused

1 Materia määratlemata omadused

Füüsika õppimist alustades kuuled ainete omaduste kohta, mis on sulle igapäevaelust tuttavad: mass, temperatuur, energia ... Kuid kas need väärtused on ikka nii arusaadavad ja selged, nagu arvad neid olevat? Kas oskaksid selgitada, mis on „temperatuur“ või „energia“? Tuleb välja, et selleks, et aru saada, kuidas tegelikkus töötab, peab tegema katseid ja vaimutööd. Füüsikas püüame esitada väiteid võimalikult täpselt ja selgelt. Seetõttu defineerime kasutatavaid sõnu nii palju kui võimalik. Siiski ei saa kõike määratleda. Peame kuskilt alustama, sõnade ja ideedega saame alustada selliselt, nagu need lihtsalt on. Lisaks peame lootma, et kõik saavad nende tähendusest ühtviisi aru. Mõisteid, nagu temperatuur, energia ja jõud, on võimalik täpselt defineerida.

Mass on omadus, mis tundub lihtsalt kõigil objektidel (mõtles auto peale) olevat. Me ei tea tegelikult, mis „mass“ on (kuigi hiljutine Higgsi bosoni avastamine aitab meil massi olemust veidi mõista). Lihtsalt öeldes on „mass“ materia omadus, mida mõõdetakse kilogrammides.

Kuid me teame, kuidas see aine omadus avaldub. Kas oskad tuua mõne näite füüsikavalemi kohta, kus mass mängib tähtsat rolli?

.....

Joonis 1: massi väljendus
(Allikas: www.dlswweb.rmit.edu.au)



Tihti peale seostame objekti massi olemasolevate „asjade“ hulgaga. Kuid kas see on ikka nii?

Kui võtad kaks identset korvi, millest ühe täidad vee ja teise õliga, märkad neid kaaludes, et õli on kergem. Selle mass on väiksem. Kas see tähendab, et selles on õli vähem kui vett? Jah/Ei

Seetõttu mõtlevad teadlased massist teistmoodi. Nad näevad, et mass mängib rolli mitmes tuntud füüsikaseaduses:

- Newtoni teine seadus
- Gravitatsioonijõud

Nende seaduste kaudu antakse sõnale „mass“ tähendus. Tuleb välja, et mass mängib füüsikas kolme põhirolli.

1. Mida rohkem on massi, seda raskem on objekt **kiirendada**.
2. Mida rohkem on massi, seda rohkem mõjub sellele **gravitatsioonijõud**.

3. Mida rohkem on massi, seda rohkem see **gravitatsioonivälja** enda ümber loob.

See peatükk ei keskendu siiski massile. Peamine mõte seisneb selles, et on olemas mõned *materjalide omadused*, mis lihtsalt eksisteerivad, ning omadused, mis põhjustavad *vastasmõju ümbritseva keskkonnaga*.

Teine selline omadus on **elektrilaeng**, mis ütleb meile midagi selle kohta, kuidas *objekt käitub elektri- ja magnetväljades*.

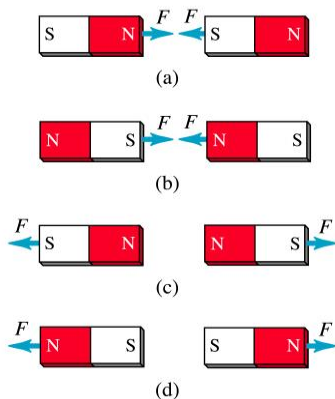
Nähtus, mida meie tahame uurida, on **spinn**. See on järjekordne omadus, mida ei saa defineerida, mistõttu ei saa me teile öelda, mis see on! Võid selle peale kaevata. Seejuures pea aga meeles, et sul polnud raske rääkida objektide massist, ilma et keegi oleks sulle kunagi seletanud, mis see tegelikult on.

Kuid mida võib spinni kohta õppida, on see, kuidas spinn mõjutab objektide käitumist. Seda me hakkamegi järgmistes osades arutama.

2 Kuidas käitub spinn magnetväljas

Tuleb välja, et *spinniga objektid käituvad nagu väikesed magnetid*. See tähendab muu hulgas, et neid mõjutab teiste magnetite kohalolek. Mis juhtub, kui võtad kaks magnetit ja hoiad neid üksteise lähedal?

.....



Kas tulemus sõltub sellest, millised magneti pooled on üksteise vastas?

.....

Igal magnetil on kaks poolt, põhja ja lõuna pool. Kahe magneti vaheline vastasmõju on kujutatud siinsel joonisel. Nendevahelise tõmbe- või tõukejõu tugevus sõltub magnetite enda tugevusest.

(Joonise allikas: www.physics.sjsu.edu/becker/physics51/mag_field.htm)

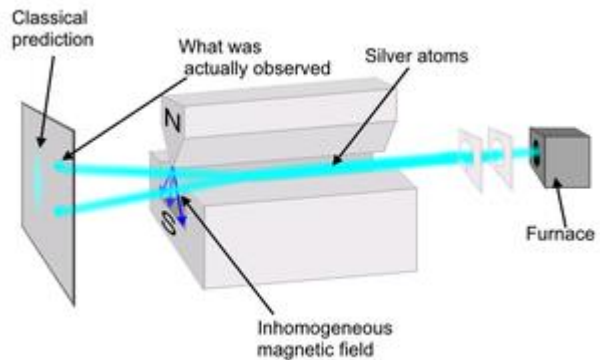
1922. a tegid *Otto Stern ja Walther Gerlach* katse, mida tänapäeval tuntakse Sterni-Gerlachi katsena, et saada teada, *kuidas magnetväli mõjutab tiirlevaid objekte*.

Sel ajal teati, et *liikuv elektrilaeng magnetväljas kaldub kõrvale*. Kuid isegi siis, kui **osakesel pole elektrilaengut, kaldub see magnetväljas ikkagi kõrvale, kui sel on spinn**.

Nad eraldasid hõbeda-aatomid. Neil aatomitel on spinn, mistõttu nad käituvad nagu magnetid. Hõbeda-aatomite kiir läbis teise magneti loodud magnetvälja. Iga hõbeda-aatom tõmbus teise magneti põhja poole (kallutades seda joonisel ülespoole) või tõukus sellest (kallutades seda allapoole). See, kas osake tõmbub või tõukub, sõltub hõbeda-aatomi spinni orienteerumisest. See tähendab, et saame erineva spinniga objekte eraldada, lastes need läbi magnetvälja. Just seda Stern ja Gerlach tegidki.

Mis määrab sinu arvates selle, mil määral hõbeda-aatomid kõrvale kalduvad?

Kõrvalekalde määr sõltub spinni väärtusest (väikese magneti tugevusest). Alguses arvati, et spinn võib olla *mistahes* väärtusega ning seetõttu peaks olema võimalik *igasugune hälvitusnurk*. Seda nähakse vertikaaljoonena (sinine joon joonise vasemal asuval ekraanil).



Üllatuslikult see tegelikult ei juhtunud. Ekraanil ilmnis **ainult kaks täppi**. Üks üleval, teine all. Mida me selle alusel spinni kohta öelda saame?

Näib, et on ainult kaks võimalikku hälvitusnurka. Väikesel magnetil oli vaid üks võimalik jõud.

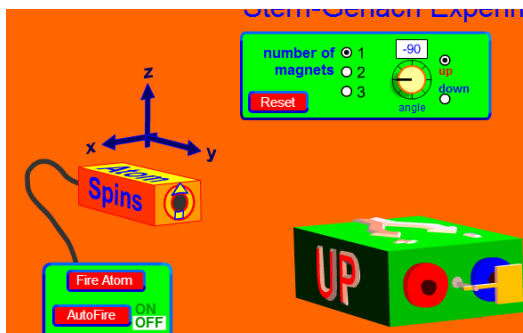
Seetõttu avastati spinni kvantiseerimine. Ütleme, et spinn on kas üleval või all. Pooltel aatomitel on spinn üleval ja pooltel all. Spinn on kvantmehaaniline omadus, millel pole klassikalises füüsikas vastet.

Selleaga aga veidrused ei lõpe.

3 Kvandi veidrused: järjestikused Sterni-Gerlachi katsed

Tegelikkuses on objektidel rohkem kui 1 spinn. Neil on koguni *3 spinni: üks igas dimensioonis*. **Aatom käitub viisil, nagu selle sees oleks 3 ristjoones asetsevat magnetit.**

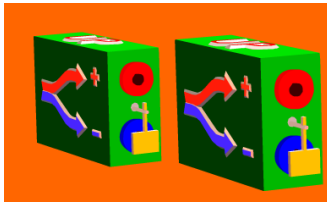
Ülal asuval Sterni-Gerlachi katse joonisel osutab magnetväli *vertikaalselt* ning *seetõttu eraldab spinni üla- ja alaosa vertikaalses suunas*. Seda katset võib korrata selliselt, et magnetväli osutab hoopis vasakult paremale.



Pheti-pletil (vt juuresolevat joonist) saad pöörata magnetvälja, mida kiir läbib, et näha, mis juhtub.

(Allikas: Phet Colorado http://phet.colorado.edu/sims/stern-gerlach/stern-gerlach_en.html)

Joonisel vasakul on kolle, kust aatomeid eraldati. Joonisel paremal on rohelises kastis magnet. Suunaga üles spinnivad aatomid tulevad välja vasakust august ja suunaga alla spinnivad aatomid paremast august. *Seega eraldame alla ja üles tulevad spinnid horisontaalselt* (neid kutsutakse alla ja üles tulevateks spinnideks, kuigi need eralduvad paremale ning vasakule).

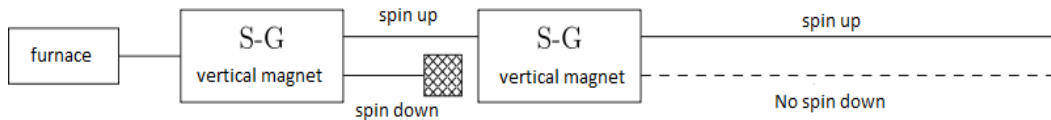


Seejärel võtame üksteise järel kaks magnetit. Esimestest magnetitest väljub kaks kiirt. Üks üles ja teine alla spinnivate aatomitega.

Kui paneme nüüd allapoole spinniva kiire ette seina, nii et teise magnetisse siseneksid üksnes ülespoole spinnivad aatomid, siis mis võiks teisest magnetist välja tulla?

.....

Tegelikult toimuvat võib kujutada alljärgnevalt:



Kuna kõikidel teise magnetvälja minevatel aatomitel on ülespoole suunatud spinn, pole üllatav, et teine magnet suunab neid üles: teise magneti väljast tulevas kiires pole allapoole spinnivaid aatomeid.



Pöörakem nüüd teist magnetit 90 kraadi (nii et see on horisontaalne). Mis sa arvad, mis juhtub?

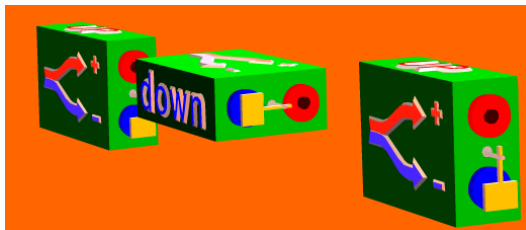
.....

Tulemus on järgmine:



Kuigi sellesse teise magnetisse sisenevatel aatomitel on kõigil ülespoole, vertikaalselt suunatud spinn, on nende spinn horisontaalsuunas endiselt suvaline, mis tähendab, et 50% spinnib üles ja 50% alla. Sellest teisest magnetväljast tuleb välja tõepoolest kaks kiirt.

Kõik see ei pruugi olla sinu jaoks üllatav, kuid vaata, mis juhtub siis, kui me lisame veel ühe magneti, nii et see on suunatud vertikaalselt.



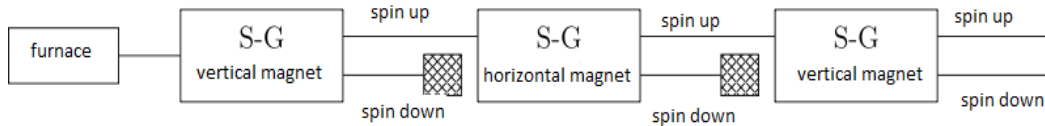
magnetist tulevad välja üksnes

Blokeerigem ka seekord teisest magnetist väljatulev kiir. Millist tulemust ootad?

.....

Kuna allapoole spinniv kiir vertikaalses suunas blokeeriti pärast esimest magnetit, võiks oodata, et kolmandast magnetist väljub üksnes ülespoole spinnivad aatomid.

Tegelikult seda aga ei juhtu. Kolmandast magnetväljast võib näha väljumast kaht kiirt, pool aatomitest läheb ülespoole ja teine pool allapoole.



Näib, et spinni mõõtmise horisontaalsuunas mõjutab üles- ja allapoole suunatud spinnide olemasolu vertikaalsuunas.

See veider efekt on kvantmehaaniline nähtus, mida ei saa seletada klassikalise füüsika kaudu. Siin toimuv meenutab IV õppemoodulis räägitut: enne mõõtmist on osake nn superpositsiooni olekus, praegusel juhul spinni võimalikes olekutes. Alles siis, kui teeme mõõtmise, on aatom (üldisemas mõttes osake) täpses spinniolekus, st teatud suunas üles- või allapoole: oleme teinud mõõtmise ja nn superpositsiooni olek on kadunud, st osake on mõõtmise tulemusena kindlaksmääratud asukohas. Seepärast on võrdne võimalus üles- ja allapoole suunatud spinniks.

Kui me nüüd mõõdame spinni vertikaalses suunas, määrame kindlaks selle suuna spinni oleku. Kui teeme samas suunas teise mõõtmise, saame sama tulemuse, sest selle suuna olek on juba kindlaks määratud. Kui aga teine mõõtmine määrab spinni oleku teises suunas, meie näites horisontaalses, siis eelnev info vertikaalse suuna kohta n-ö kustutatakse. Teine mõõtmine teises suunas toimib nii, et olekute superpositsioon (st võimalikud spinni olekud) algse suunas (meie näites vertikaalses) taastub!

See spinni kvantmehaaniline omadus pole mitte ainult väga põnev, vaid ka ülitähtis eri rakendustele, sealhulgas **meditsiinilisele pildindusele** ja mõnele aspektile **elektronikas**. Muude spinnirakenduste puhul ei tohiks me unustada mainimast, et keemiliste elementide elektroonilise struktuuri (**perioodilisustabel**) juures kasutatakse asjaolu, et elektronidel on kaks eri spinni. Loodetavast oled sellest oma keemiatundides kuulnud.

Katse nn kvantkustutamise teemal:

Kui tahad nn kvantkustutamisest rohkem teada, saad selle kohta lugeda siit ja teha katse: <http://www.arturekert.org/miscellaneous/quantum-eraser.pdf>.

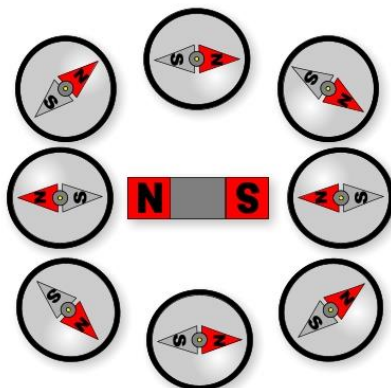
4 Rakendus: magnetresonantstomograafia (MRI)

Nagu eespool mainitud, käituvad spinnid väikeste magnetitena. Mida sa näed, kui kompassiga ringi liigud?

.....

Seleta, mis juhtub:

.....



Üks magnetite omadusi on see, et magnetid ühilduvad neid ümbritseva magnetväljaga. Seetõttu osutab kompassinõel alati põhja. See järgib maa loodava magnetvälja suunda.

Inimkehas on üsna palju vett. Iga veemolekul H_2O koosneb kahest vesinikaatomist. Iga vesiniku H kohta on prooton koguspinniga.



Kui patsiendiga viiakse läbi MRI-d (magnetresonantstomograafia), pannakse ta silindrikujulisse kookonisse. Selle silindri kestas on tugevad magnetid.

Kehas asuvad spinnid *kipuvad joonduma masina magnetvälja magnetite järgi*. **Vastupidiselt kompassis asuvale nõelale saavad vesinikaatomid asuvad spinnid osutada ainult kahte suunda: üles või alla.**

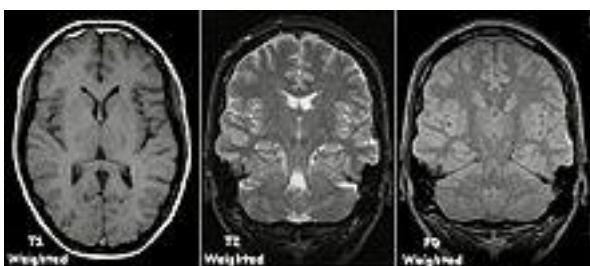
Spinnid *omakorda* loovad samuti magnetvälja, mida saab masina abil *mõõta!* Vaadake, kuidas see töötab!

Kui patsient on MRI skanneri sees, lisatakse *muutuv magnetväli*, mis paneb kehas asuvad spinnid *järgima* muutuvat magnetvälja. See, kui paljud spinnid tegelikult muutuvat magnetvälja järgivad, sõltub selle muutmise sagedusest.

Ühe kindla sageduse juures on muutuvate spinnide **arv maksimaalne**. Seda nähtust kutsutakse *tuuma magnetiliseks resonantsiks* (mistõttu teatakse sellist skannijat ka NMR skannijana).

Saad seda ise järgmise apleti abil järele proovida: <http://phet.colorado.edu/en/simulation/mri>

Muutust spinnide enda suunas on võimalik mõõta, sest *nende loodud magnetväli muutub koos* nende suunamuutusega. Kui masina muutuv magnetväli *välja lülitatakse*, liiguvad spinnid *uuesti* olekusse, kus nad on joondunud skannija mittemagnetilise väljaga. **Aeg**, mis kulub taas sellisesse seisu jõudmiseks, on *eri kudede puhul erinev* (näiteks on see erinev tervel ja vähist puudutatud koel). Seda nn *taastumisaega mõõtes* saavad arstid **teada teatud tüüpi kudede (või kasvajate) olemasolust või nende puudumisest**.



See on näide tüüpilise MRI skannija tehtud pildi kohta.

MRI on sedavõrd tähtis, et **2013. a Nobeli preemia psühholoogia** või meditsiini eest anti Paul Lauterburile ja Peter Mansfieldile selles valdkonnas tehtud uurimistöö eest.

5 Rakendusala: spintroonika

Me kasutame elektriseadmeid kogu aeg. Kuid kuidas seade teab, mida ta peab tegema ja millal? Kuidas minu arvuti mäletab, et selle sees on failid? Kuidas arvuti neile ligi pääseb ja neid vajaduse korral muudab?

Nendele küsimustele vastuste otsimine võib olla üsna keerukas. Ükskõik kui raske see on, *kõik taandub elektrile ja magnetitele.*



Sa tead, et arvutid töötavad üksnes nullide ja ühtedega. Arvutis on suur hulk vooluringe ja juhtmeid ning need toimivad selliselt, et *see reageerib ühel viisil, kui vool läheb läbi kindla juhtme, ning teisel viisil, kui juhtmes pole voolu.*

Kui määrame nüüd, et on vool 1 ja voolu puudumine 0, (või vastupidi), saame kõike, mida arvuti teeb, nullide ja ühtede abil väljendada. Kõvakettal on **info salvestatud pisikestesse magnetitesse**. Kui nende põhjapoolus osutab ühes suunas, kutsume seda 1-ks ja muidu kutsume seda 0-ks. Ka info on salvestatud binaarselt.

Sterni-Gerlachi katses õppisime, et **aatomite spinn võib omada ainult üht kahest väärtusest**. Kutsudes üht neist 1-ks ja teist 0-ks, *võib nüüd ka spinni kasutada info kodeerimiseks!*

Topeltpilude katses teame ka, et kvantobjektid võivad ühel ajal läbistada mõlemat pilu. See võib olla samal ajal eri olekutes. Kuna spinnil on kvandi omadused, võib spinni aatom korraga olla *üles- ja allapoole suunatud olekus*. See tähendab, et me saame tegelikult spinnis rohkem infot säilitada kui lihtsalt 1 või 0. Elektroonikavaldkonda, milles kasutatakse spinne, kutsutakse **spintroonikaks**.

2007. a anti Nobeli preemia sellise nähtuse avastamise eest nagu hiidmagnetresonants (GMR), mis on tugevalt seotud spintroonikaga. Tänu sellele **hiidmagnetresonantsi efektile** saad kasutada 'väga väikeseid suuri' kõvakettaid. Nähtus, mille eest Ibert Fert ja Peter Grünberg Nobeli preemia said, põhineb elektronide hajumise sõltuvusel (takistus) *spinni* suunast.

6 IX õppemooduli mõisted

Kirjuta lünkadesse puuduvad mõisted!

Klassikalise füüsika mõisted

Spinniga kehad käituvad nagu väiksed magnetid – spinniga osakesed kalduvad magnetväljas kõrvale. Kõrvalekaldumise määr sõltub

Kvantfüüsika mõisted

Spinn on kvantiseeritud – kehadel on ja, igas mõõtmes.

Spinni iga mõõtmine ühes kindlas suunas toimib nagu nn kvantkustutamine – eelmise mõõtmisega teises suunas kogutud info n-ö kustutatakse.