



Sild, mis ühendab uurimistööd tänapäeva füüsikas  
ja ettevõtlust nanotehnoloogias

## Kvantfüüsika

*Tillukeste asjade füüsika, millel on hiiglaslikud  
rakendusvõimalused*

### 2. osa

## KVANTOMADUSED JA TEHNOLOOGIA



### VI õppemoodul: *Fotoefektist digitaalse pildini*



Lifelong  
Learning  
Programme

Quantum Spin-Offi rahastab Euroopa Liit LLP Comeniuse programmi kaudu.

(540059-LLP-1-2013-1-BE-COMENIUS-CMP)

Renaat Frans, Laura Tamassia, Erica Andreotti

Kontakt: [renaat.frans@khlm.be](mailto:renaat.frans@khlm.be)

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

TÖLKIJAJA:



## 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 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 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.

# Sisukord

## 2. osa: kvandi omadused ja tehnoloogia

<b>VI ÕPPEMOODUL: FOTOEFEKTIST DIGITAALSE PILDINI</b>	<b>5</b>
<b>1 Mida sinu digitaalkaamera tegelikult teeb?</b>	<b>5</b>
<b>2 Fotoefekt</b>	<b>7</b>
2.a Fotoefekt klassiruumis	8
2.b Fotoefekt: virtuaalne katse	10
<b>3 Einsteini fotoefekti teooria</b>	<b>12</b>
<b>4 Sisemine fotoefekt ja laengsidestusseadis</b>	<b>13</b>
<b>5 VI õppemooduli mõisted</b>	<b>15</b>

### 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



# VI õppemoodul: fotoefektist digitaalse pildini

## 1 Mida sinu digitaalkaamera tegelikult teeb?



Joonised 1 ja 2: digitaalkaamera 24x optilise muudetava suurendusega ning 14 megapiksliga (allikas: KHLim)

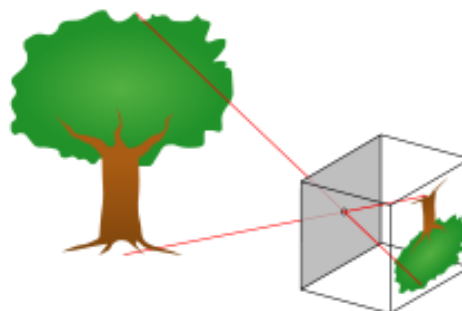
### **Kas oled endalt kunagi küsinud, mis tegelikult juhtub, kui teed digitaalkaameraga pilti ning näed seda digitaalsel ekraanil?**

Võib-olla mitte, sest oled veel liiga noor, et sul oleks kogemusi filmifotograafiaga, ning sulle tundub pildi kuvamine ekraanil ilmselge.

Tegelikult on see ilmselgest kaugel. Seal juhtub midagi fundamentaalsel füüsilisel tasandil, mis on peidetud sinu kaamera sisestruktuuri. Harutagem see saladus lahti.

Kui teed pildi mistahes kaamera või isegi oma silmadega, siis kogud läätse kaudu .....

See ....., mis tuleb teatud allikast, näiteks päikesest või lambist, on reageerinud kaamera ümber asuva materiaga. Tulemuseks on see, et kui see jõuab läätseni, kodeerib see infot, mis on seotud kaamera ümbruses asuvate objektide kuju, värvuse ja nende asukohaga üksteise suhtes.



Joonis 3: 'camera oscura' (pimiku) tagant saabuv valgus peab sisaldama teavet puu kohta. Kuidas muidu saaks puu skaleeritud kujutis sinna üldse langeva valguse toimel ilmuda? (Allikas: Wikipedia)

Sama toimub sinu silmaga: kogud ..... oma silmas asuva ..... kaudu ning seda analüüsid oled võimeline eraldama ..... sinu ümber asuvast materiasst.

See info, mis on valgusesse kodeeritud meid ümbritsevast materiasst, on miski, mida soovime kaameraga leida, muuta ja säilitada, et saaksime seda hiljem kasutada.

Mis sa arvad, mis vahe on vanal filmikaameral ja digitaalkaameral? (rohkem variante võimalikud)

- (a) Valguse kogumise tasandil (läätse optika)
- (b) Valgusesse kodeeritud info muutumise tasandil
- (c) Valgusesse kodeeritud info säilitamise tasandil

Vanas filmikaameras transformeeritakse info mustriks fotofilmi (või plaadile). See on keemiline protsess, mille käivitab filmi peale langev valgus, mis muudab filmi omadusi jäädavalt. Seetõttu töötab fotofilm või plaat ka säilituskohana.

### **Kuid milleks muundub digitaalkaamera puhul info, mis oli esialgu kogutud valgusesse kodeeritud?**

Sellele küsimusele vastamisel võib olla abi sellest, kui mõelda hetkele, mil ühendad oma kaamera arvutiga ja visualiseerid pilte arvuti välisekraanil.

Mida kaamera ja arvuti ühendamiseks kasutada?

.....

Mis seal juhtub? (see tähendab: kuidas info füüsiliselt liigub?)

.....

Miski liigub ühendava kaabli mikrotasandil: mis see on?

.....



*Joonis 4: oma kaamera ühendamine arvutiga (allikas: KHLim)*

Nagu oled eelnevateski õppemoodulites näinud, võib valgus, samamoodi nagu materia, käituda kas ..... või ..... kiirtena.

Osakesed, millest valgus koosneb, on .....

Väga hea näide selle kohta, kuidas need valguse kaks omadust üheskoos eksisteerivad, on topeltpilude katse, milles valgus liigub footoni haaval (vaata IV õppemooduli laineosakeste duaalsusest).

Seal näed selgelt, et tegelikult tuvastatakse ....., mis jätavad ükshaaval ekraanile märgi ning kõik koos moodustavad mustri, antud juhul difraktsioonimustri, mis on tüüpiline ..... käitumisele.

Tegelikult saame sama öelda ka kaamera kohta. Kaamera tuvastab ....., mis lähevad läbi kaamera läätse.

Seejärel konverteerib digitaalkaamera teatud viisil fotonitesse maailma kohta kodeeritud info elektrisignaali, mis on elektriline ..... ning mis koosneb liikuvaatest .....

Siiski on veel üks samm elektrisignaali ja failide vahel, kuhu info salvestatakse. Nagu ilmselt väga hästi tead, peab kõike, mida arvuti mõistab, väljendama numbrite, ..... ja ..... seeriatena. Selles peitub sõna „digitaalne“ tähendus.

Digitaalkaamera peab seejärel konverteerima elektrisignaali digitaalsignaalsiks, et arvuti saaks seda lugeda ja säilitada.

Selles õppemoodulis keskendume esimesele osale, nimelt footoni signaali muundumisele elektrisignaalsiks.

Kokkuvõtteks:

Kaamera, nii filmi- kui ka digitaalkaamera, kogub läätse kaudu ....., mida võib kirjeldada osakeste kiirtena: .....

Kogutud ..... kodeerivad ühiselt infot kaamera ümbruses asuva ala kohta.

Digitaalkaamera muundab esiteks footonitel põhineva info kodeerimise elektrisignaalsiks, mis põhineb liikuvate ..... vool.

Elektrisignaali muundatakse hiljem digitaalsignaalsiks (mis koosneb ..... ja .....), mida arvuti suudab mõista ja failis säilitada.

**Kuid kuidas saab muundada kaamera läätse kaudu kogutud footonid liikuvate elektronide vooks?**

## 2 Fotoefekt

Albert Einstein sai 1921. a Nobeli preemia füüsikas.

Millise teooria järgi sa Einsteini tead?

.....

Uuri internetist järele. Mis teooria eest sai Einstein Nobeli preemia?

.....

Me kõik seostame Einsteini tema elegantse relatiivsusteooriaga.

Kuid tema panus 20. sajandi füüsikasse on sellest suurem.

Einstein on tegelikult ka üks kvantmehaanika isasid ning nagu järgmistest peatükkidest näha, peaksid tema peale mõtlema iga kord, kui oma digitaalkaamerat kasutate.



6. Über einen  
die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes  
betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;  
von A. Einstein.

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die  
Physiker über die Gase und andere ponderable Körper ge-

Joonis 5: Einstein patendiameti ukse juures 1905. a, mis oli tema jaoks eriti viljakas  
(Foto allikas: Wikipedia)

See füüsikafenomen, mis teeb sinu digitaalkaameras võimalikuks muundada tuvastatud fotonites sisalduv info elektrisignaals, on üllataval kombel ka üks esimesi seletamatuid nähtusi, mis viis 20. sajandi alguses klassikalise füüsika sügavasse kriisi ning juhtis kvantmehaanika arendamiseni: **see on fotoefekt.**

Kvalitatiivses mõttes seisneb fotoefekt üksnes faktis, et **elektronid vabanevad metalli pinnalt, kui valgus neile peale paistab.**

Üldiselt saavad elektronid vabaneda metalli pinnalt üksnes siis, kui neile antakse energiat. Minimaalne energiakogus, mida elektron vajab, et end metalli pinnalt vabastada, on eri metallide puhul erinev. Tsingi korral nimetame seda nii:  $E_{\text{tsink}}$ .

Fotoefekti **kvalitatiivseid** omadusi saab ideaalselt seletada klassikalise füüsika kaudu. Elektromagnetlaineks modelleeritud valgus toob kaasa elektrivälja metallis paiknevatele elektronidele, mis on ..... osakesed.

Elektriväli rakendab laetud osakesele jõudu ning elektrivälja laetud osake saab energiat. Kui väli on küllalt tugev, saavad elektronid piisavalt energiat, et metallist põgeneda.

Kuid **kvantitatiivses mõttes** satub uurija kohe vastamisi fotoefekti väga kummaliste omadustega.

Kas elektronid põgenevad või mitte, sõltub metallile langeva valguse värvist (sagedusest). On olemas **miinimumsagedus**, mille puhul elektronid saavad põgeneda.

## 2.a Fotoefekt klassiruumis

### Fotoefekti saad näitlikustada lihtsa katsega klassiruumis.

Katseks vajad elektroskoopi, tsinkplaati, katseklaasi ja paberitükki, et seda laadida (kõik tarvikud peaksid olema saadaval kooli laboris). Samuti vajad UV-C lampi, mis on tavaliselt kooli laboris olemas, kuid selle võib tuua ka tee-seda-ise poe aiandusosakonnast.<sup>1</sup>

Kinnita tsinkplaat elektroskoobile ning lae see negatiivselt, kasutades paberiga hõõrutud katseklaasi.

Nüüd saad lasta erineval valgusel peale paista.

Näed, et elektroskoop on endiselt laetud, kui tavaline valge valgus sellele peale paistab. Võid sama proovida ka infrapunalambiga. Ka sellega ei juhtu midagi. Elektroskoop on endiselt laetud.

Kui aga lased laetud elektroskoobile peale paista valgust UV-C lambist, näed, et elektroskoop kaotab kiirelt oma negatiivse laengu.

See tähendab, et metallplaadis asuvad negatiivse laengu kandjad, s.o ....., on suutnud sellest UV-C valguse toimel põgeneda.

---

<sup>1</sup> UV-C valgust kasutatakse veefiltrites bakterite tapmiseks. See on üsna energiarikas elektromagnetkiirgus, nii et peaksid sellega väga ettevaatlik olema. Lase sel paista tsinkplaadile, kuid mitte oma nahale või silma. Kata see tumeda paberiga, nii et valgus paistaks ainult tsinkplaadi suunas.



Nagu tead, on UV-kiirgusel ..... sagedus kui nähtaval valgusel ja infrapunavalgusel. Vajad lampi, mis eraldaks piisavalt kõrge ..... kiirgust, et elektrone tsinkplaadilt vabastada.

See katse ei tööta, kui laed tsinkplaadi positiivselt. Miks?

.....  
 .....

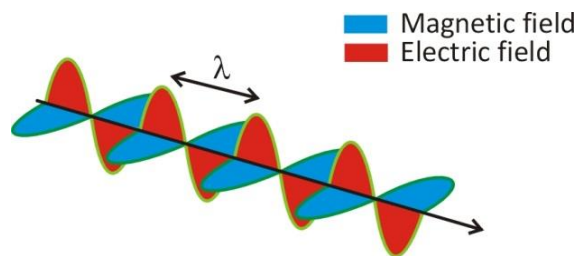


Joonis 6: Belgia õpetaja demonstreerib fotoefekti elektrooskoobi ja UV-C lambiga

**Klassikalise füüsikaga ei saa seletada seda, mida sa äsja elektrooskoobi abil nägid.**

Miks vabanevad elektronid metallist üksnes juhul, kui neile paistab peale teatud sagedusega valgus?

Nagu 3. õppemoodulis nägid, kujutab valguse klassikaline mudel seda elektromagnetilise .....



Joonis 7: elektromagnetlaine koosneb võnkuvast elektriväljast ja sellega ristuvast võnkuvast magnetväljast. (Allikas: photonicswiki)

Kui elektrivälja magnituud on küllalt suur, peaks elektronid saama piisavalt energiat, et põgeneda, ja seda olenemata elektrivälja võnkumise perioodilisusest.

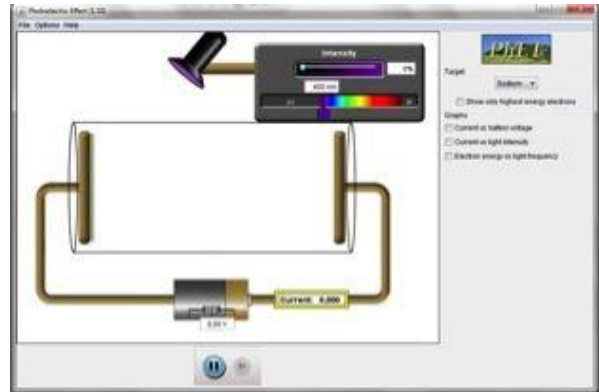
## 2.b Fotoefekt: virtuaalne katse

Virtuaalset keskkonda kasutades mõistad fotoefekti müstilisi kvantitatiivseid omadusi paremini.

Ava PhETi aplett:

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>

Joonis 8: ekraanitõmmis PhETi fotoefektist



### Virtuaalne katsekeskkond

Vaatle esmalt keskkonda ilma parameetrid muutmata. Näed, et valgus või üldisemalt elektromagnetkiirgus võib kiirata vasakul asuvale metallplaadile ning selle ette paremale on asetatud teine metallplaat.

Need kaks plaati on suletud elektronlampi ning väliselt ühendatud juhtiva juhtmega. Saame mõõta juhtmes olevat voolu.

Vali nüüd kahe plaadi vahelise potentsiaalse erinevuse väärtuseks 3,00 V.

Paremast tulpast saad valida ka metalli vasakul asuva plaadi jaoks, millele valgus paistab.

Et taasesitada klassis nähtud katset elektrooskoobiga, pead valima .....

Me ei muuda katse vältel enam potentsiaalset erinevust ega metalli.

### Lainepikkuse/sageduse ja langeva valguse intensiivsuse seos

Lülita nüüd valgus sisse, valides ülal intensiivsuseks 50% selle maksimumväärtusest. Ära praegu valguse lainepikkust muuda.

Kas sellises olukorras ilmneb fotoefekt? Jah/Ei

Nüüd suurenda intensiivsus aeglaselt maksimaalseks.

Kas fotoefekt hakkab sellise sageduse ja intensiivsema valguse juures ilmnema? Jah/Ei

Nüüd jäta intensiivsus maksimaalseks ning muuda aeglaselt lainepikkust infrapunaks (IR) – see tähendab pikemat/lühemat (*pikemat*) lainepikkust, mis vastab kõrgemale/madalamale sagedusele.

Kas fotoefekt ilmneb maksimaalse intensiivsuse ja ..... sageduse juures?

Jah/Ei

Nüüd jäta intensiivsus maksimumtasemele ning muuda aeglaselt lainepikkust ultravioletiks (UV) – see tähendab pikemat/lühemat (*lühemat*) lainepikkust, mis vastab kõrgemale/madalamale sagedusele.

Kas fotoefekt ilmneb maksimaalse intensiivsuse ja ..... sageduse juures?

Jah/Ei

Leia lainepikkus, mille juures fotoefekt hakkab tsiingi puhul ilmnema:

$$\lambda = \dots\dots\dots$$

Kontrolli allolevat mõõdetavat voolutugevust. Kas saame fotoefekti sel lainepikkusel mõõta?

Jah/Ei

Leia lainepikkus, mille puhul saame selles katsekeskkonnas mõõta fotoelektrilist voolu tsiingi puhul:

$$\lambda = \dots\dots\dots$$

Viimaks, alanda selle lainepikkuse juures järk-järgult langeva kiirguse intensiivsust. Mis juhtub vooluga?

.....

Vali nüüd selle katse juures väikseim võimalik lainepikkus,  $\lambda = 100 \text{ nm}$

Mis juhtub vooluga, kui intensiivsust muudad?

Suurem intensiivsus tähendab kõrgemat/madalamat voolu.

Võtke kokku **fotoefekti kvantitatiivsed omadused**, mida vaatlesime:

1. Eksisteerib minimaalne ..... langevat valgust, mille mõjul ..... saavad metallplaadist põgeneda.
2. Langeva valguse ..... suurendamine antud sagedusel ei mõjuta seda, kas elektronid saavad sel sagedusel vabaneda või mitte.
3. Võttes aluseks sageduse, mille juures fotoefekt avaldub, põhjustab langeva valguse intensiivsuse suurendamine toodetava ..... suurenemise.

### Seos klassis tehtud katsega

Uuri internetist, mis on lainepikkuste vahemik UV-A, UV-B ja UV-C valguse puhul:

UV-A: vahemikus ..... nm ja ..... nm

UV-B: vahemikus ..... nm ja ..... nm

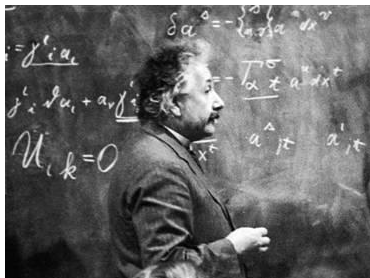
UV-C: vahemikus ..... nm ja ..... nm

Tuginedes sellele teabele ja apleti abil kogutud infole, võid järeldada, et fotoefekti vaatlemiseks tsiingi puhul on sul vaja lampi, mis toodab elektromagnetkiirgust vahemikus .....

Elektroskoobiga tehtud katse ei tööta koolilaborist leitava standardse UV-A või UV-B lambiga ega ka valge või infrapunalambiga. Tuleb osta *pond*-filterlamp, mis emitteerib kiirgust standardse koolilaborist leitava UV-lambiga võrreldes lühematel/pikematel lainepikkustel ja kõrgematel/madalamatel sagedustel.

Apletit kasutades oleme saanud jälgida fotoefekti kvantitatiivseid omadusi lähemalt. Kuid see ei tähenda, et oskaksime neid seletada!

Selle saavutamiseks tuleb meil esmalt Einsteiniga arutada.



### 3 Einsteini fotoefekti teooria

Einsteini hüpotees fotoefekti seletamiseks seisneb selles, et langeva valguse ja metallplaadi vahel saab energiat vahetada üksnes **eraldiseisvates energiapakikeses** (kvantides),

$$E = h f$$

kus  $f$  on langeva valguse sagedus ning  $h$  Plancki konstant.

Üks elektron saab kaasa võtta üksnes ühe energiapakikese. Need pakikesed annavad edasi osakeste (footonite) energia.

Nüüd oskad Einsteini hüpoteesi kasutades seletada fotoefekti kolme müstilist kvantitatiivset omadust, mida oled jälginud katsetes nii päriselus kui ka virtuaalselt.

- 1. Eksisteerib minimaalne ..... langev valgus, mille mõjul saavad ..... metallplaadilt põgeneda.**

Elektron vajab vähemalt energiat  $E_{\text{tsink}}$ , et metallist vabaneda.

Üks elektron saab valguselt ühe energiapaki  $E = h f$

Seetõttu saab elektron põgeneda, kui  $h f$  .....  $E_{\text{tsink}}$ . (sisesta  $\leq$ ,  $\geq$ ,  $<$ ,  $>$  või  $=$ )

Kui tuua sümbol  $f$  võrrandi ühele poolele ja teised võrrandi teisele poolele, leiad, et

$$f \dots\dots\dots$$

Langeva valguse miinimumsagedus  $f_0$ , mille juures fotoefekt metallis avaldub, on

$$f_0 = \dots\dots\dots$$

- 2. Langeva valguse ..... suurendamine antud sagedusel ei mõjuta seda, kas elektronid sel sagedusel saavad põgeneda või mitte.**

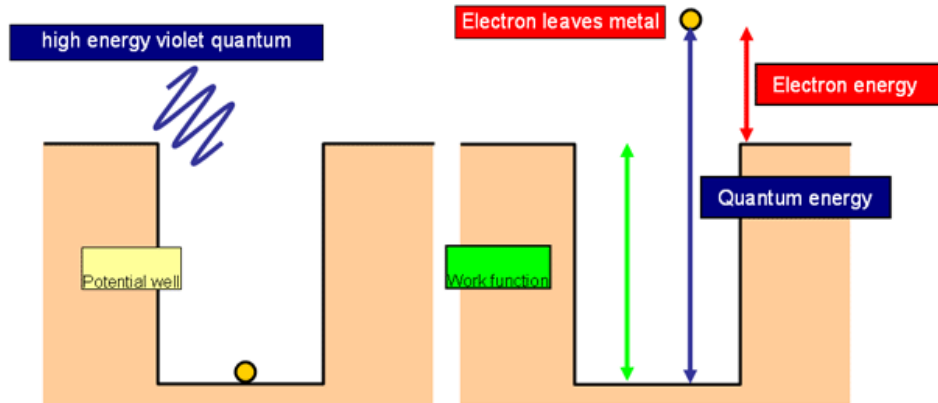
Kui langeva valguse intensiivsus suureneb, muutub rohkem ..... energiat kättesaadavaks, kuid üksiku pakikese ..... see ei mõjuta.

Kuna üks elektron saab võtta vaid ühe ....., ei mängi valguse intensiivsus miinimumsageduse juures mingit rolli.

- 3. Kui võtta sagedus, kus fotoefekt avaldub, suureneb langeva valguse intensiivsuse tõstmisel toodetavate ..... arv.**

Suurem intensiivsus tähendab, et saadaval on ..... energiapakikesi. Seetõttu on metallis rohkem ....., mis saavad põgeneda. Selle tulemuseks on suurem .....

Elektron vajab metalli pinnalt põgenemiseks energiat. Selle illustreerimiseks võib joonistada elektroni energiakaevu. Kaevu sügavus annab elektronile põgenemiseks vajamineva energia. Sissetulevast elektromagnetkiirgusest saab elektron ühe energiapakikese. Elektron saab põgeneda juhul, kui see energia on kaevu sügavusest suurem või sellega võrdne. Energiapakikese ja kaevu sügavuse erinevus on kineetiline energia, millega elektron välja tuleb.



(Diagram: resourcefulphysics.org)

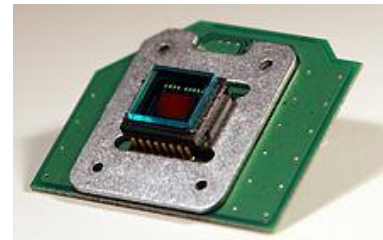
Joonis 9: fotoefekti skemaatiline esitus, kasutades energiakaevu mõistet (allikas: Institute of Physics, [http://tap.iop.org/atoms/quantum/502/page\\_47014.html](http://tap.iop.org/atoms/quantum/502/page_47014.html), originaalvariant lehelt resourcefulphysics.org) Joonisel: elektroni energia on põgenenud elektroni kineetiline energia ja kvandi energia on elektroni poolt neelatud UV-kvandi energia.

## 4 Sisemine fotoefekt ja laengsidestusseadis

Kui mõtled tagasi elektrooskoobi ja tsinkplaadiga tehtud katsele, tuleb sulle meelde, et nähtava valgusega efekti ei ilmnenu. Vajasite fotoefekti nägemiseks kõrge sagedusega UV-C valgust.

Kuid sellest pole loomulikult kasu, kui soovime muundada kaamera läätse tabatava nähtava valguse elektronideks! Vajame sarnast efekti, mis töötaks elektromagnetkiirgusega **täielikus nähtavas spektris**.

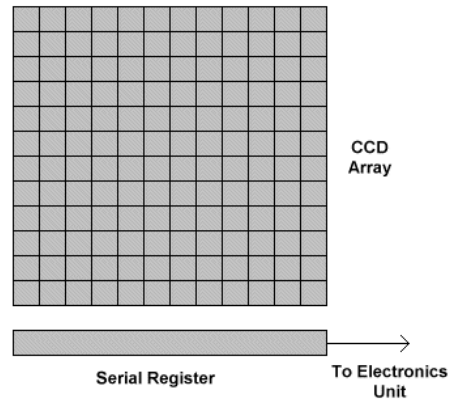
Hea uudis on see, et **pooljuht** nagu **silikoon** näitab ka nähtavas valguses teatud fotoelektrilisi omadusi! Siiski tuleb märkida, et kui standardse fotoefekti puhul saab metallis paiknev elektron põgeneda *metalli pinnalt*, omandades footoni energia, siis pooljuhi puhul võimaldab foton seotud elektronil (pooljuhi valentsitsoonis) „hüpata“ juhtivustsooni ja seega vabalt *pooljuhi sees* ringi liikuda. Sel põhjusel kasutatakse terminit **sisemine fotoefekt**: vabastatud elektronid jäävad materjali sisse.



Joonis 10: CCD-d kahelt eri 2,1-piksliselt digitaalkameralt (allikas: Wikipedia)

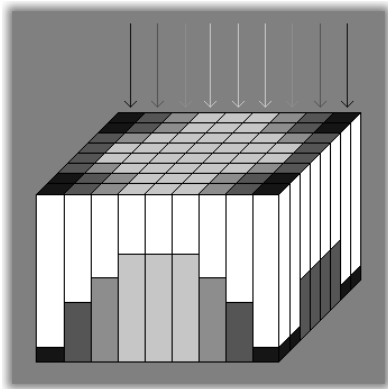
**Laengsidestusseadis (CCD)** on kiip, mis muundab elektromagnetkiirguse (fotonid) elektrisignaalsiks (elektronideks). Digitaalkaameras paikneb see lätse taga.

Tavaliselt on seal kasutatud õhukest silikoontahvliit. See on jagatud miljoniteks ruudukesteks ehk **fotolehtedeks**, mis vastavad **pikslitele** lõpp-pildil. Näiteks ruudul 1000 x 1000 on 1 000 000 fotolehte, mis tähistab 1 000 000 pikslit või 1 megapikslit.



Joonis 11: 12 x 12 fotoleht CCD

(Allikas: Starizona <http://starizona.com/acb/ccd/introimaginghow.aspx>)



Kui foton põrkab vastu ruutu, vabaneb elektron. Elektrone säilitatakse fotolehtede seinte piires. Fotolehti, mis toodavad rohkem elektrone ja tugevama voo, seostatakse lõpp-pildil heledamate pikslitega, ning fotolehti, mis toodavad vähem elektrone, seostatakse tumedamate pikslitega.

*Joonis 12: mustvalge pildi rekonstrueerimine, lugedes kokku fotoefekti mõjul toodetud elektronid igal fotolehel (histogramm silikoonruudu all). Need fotolehed, kus on toodetud vähem elektrone, on tumedamad, ning need, kus rohkem elektrone, on heledamad*

(Allikas: Starizona <http://starizona.com/acb/ccd/introimaginghow.aspx>)

Kuid sel viisil saame rekonstrueerida üksnes **mustvalge pildi**.

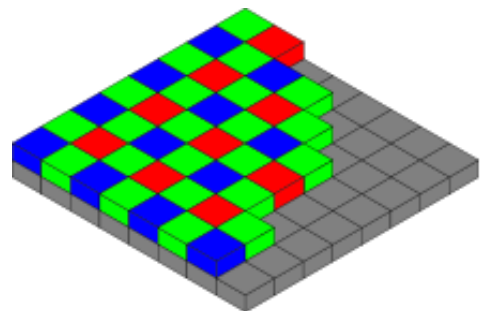
Kuidas samade põhimõtete abil **värvilist pilti** rekonstrueerida?

Mida saab kasutada, et valida kindlat värvi valgus optilises katses?

.....

Lihtsaim ja enamikus digitaalkaamerates kasutusel olev viis värvipildi rekonstrueerimiseks on panna CCD-le filtreeriv kate, nagu on näidatud alloleval joonisel. Sel moel saab iga väike ruut üksnes valitud värvi fotonid. Seega, vanade fotolehtede ..... muutuvad üheks värviliseks fotoleheks. Saame tuvastada, kui palju siniseid, punaseid ja roheline fotonid on sinna jõudnud. Kuna ..... ja ..... värviga on võimalik segada kõiki värve, saad nende abil täieliku värvipildi rekonstrueerida.

Sisemist fotoefekti pooljuhtides kasutatakse ka **photodiodes**. **Päikesepaneel** on suure pinnaga fotodioid (vt VII õppemooduli pooljuhtide kohta).



Joonis 13: värvifiltri kate CCD-I (allikas: Wikipedia)

## 5 VI õppemooduli mõisted

### Kirjuta lünkadesse puuduvad mõisted!

#### Klassikalise füüsika mõisted

Fotoefekti kvalitatiivseid omadusi saab ideaalselt seletada klassikalise füüsikaga. ....  
modelleeritud valgus toob kaasa elektrivälja metallis paiknevatele elektronidele, mis saavad energiat.  
Kui väli on küllalt ....., saavad elektronid piisavalt energiat, et metallist põgeneda.

#### Kvantfüüsika mõisted

Fotoefekti kvantitatiivsete omaduste seletamiseks vajame kvantfüüsikat: kas elektronid saavad  
põgeneda või mitte sõltub metallile paistva valguse ....., On olemas  
....., mille puhul elektronid saavad põgeneda.

**Einsteini hüpotees:** langeva valguse ja metallplaadi vahel saab energiat vahetada üksnes  
..... (kvantides):  $E = hf$ .

Langeva valguse ..... suurendamine antud sagedusel ei mõjuta seda, kas  
elektronid saavad põgeneda või mitte.

Kui võtta sagedus, kus fotoefekt avaldub, suureneb langeva valguse intensiivsuse tõstmisel  
toodetavate ..... arv.