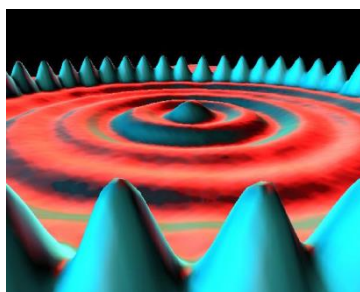




Sild, mis ühendab uurimistööd tänapäeva füüsikas
ja ettevõtlust nanotehnoloogias

Kvantfüüsika

*Tillukeste asjade füüsika, millel on hiiglaslikud
rakendusvõimalused*



TÖLGE:



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

Renaat Frans, Hans Bekaert, Laura Tamassia, Erica Andreotti

Kontakt: renaat.frans@khlm.be

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

Sissejuhatus 1. osasse: Milleks kvantfüüsika?

Õppemoodulite 1. osas uurime kvantfüüsika päritolu, alustades nähtustega, mida klassikaline füüsika ei suutnud seletada. Samm-sammult püüame neist nähtustest aru saada. Õppemoodulites käsitleme kõrvuti klassikalise füüsika ja kvantfüüsika mõisteid, et paremini aduda, kuidas kvantfüüsika on aidanud meil universumi toimimist mõista. Kuna klassikalise füüsika mõisted on kvantmaailma mõistmiseks väga olulised ja õppemoodulites leiavad käsitlust mõlemad, on iga peatüki lõpus toodud kokkuvõtte peamistest klassikalise füüsika ja kvantfüüsika mõistetest. See kokkuvõtte on harjutuse vormis, andes õpilasele võimaluse neid kahte "tüüpi" mõisteid eristada ja õpitud materjal veelkord üle vaadata.

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

I õppemoodul: Seletamatu nähtus

Meie teekond algab elektronidega tehtava kahe pilu katsega: kas väikestel osakestel on kindel trajektoor, nagu näeb ette klassikaline füüsika? Kas saame vaadeldavaid nähtusi seletada, mõeldes elektronidest kui väga väikestest osakestest? Võrdleme kahe pilu katseid, mida tehakse liiva, elektronide ja valgusega, ning püüame mõista mateeria ja valguse loomust – kas saame ikka veel tõmmata selge piiri meie maailma lainelise ja osakeseline käitumise vahele?

Seejärel püüame seletada molekulide omadusi, mida klassikaline füüsika ei ole suutnud siiani seletada. Vaatame elementide kiirgus- ja neeldumisspektreid ning mõtleme, kas need on seletatavad Rutherfordi klassikalise aatomimudeliga või vajame selleks hoopis kvantfüüsika mõisteid.

II õppemoodul: Mis on valgus?

II õppemoodulis alustame kahe pilu katse tulemustest ja keskendume valguse loomusele. Valguse käitumise mõistmine aitab meil paremini aru saada kõigi osakeste käitumisest ning I õppemoodulis tehtud vaatlustest. Siin on peamiseks küsimuseks, kas valguse käitumist saab seletada, mõeldes valgusest kui osakestest koosnevast kiirest või hoopis kui lainest. Seda uurime klassikalise füüsika abil ning tutvume valgusteooriate ajalooga.

III õppemoodul: Mis võngub valgusega?

Kui valgust pidada laineks, siis peame uurima, mis paneb valguslained võnkuma ja levima. Uurime seda klassikalisele füüsikale tuginedes ning võrreldes valgust mehaaniliste lainetega. Süüvime ka klassikalise füüsika "välja" mõistesse, mis on üheks põhimõisteks ka kvantfüüsikas.

IV õppemoodul: Osakese-laine dualism

Eelnevates õppemoodulites käsitlesime valguse kui laine omadusi, seletades neid klassikalise füüsika abil. Nüüd on aeg astuda samm edasi ja uurida valguse kvantloomust. Mis juhtub, kui teeme kahe pilu katse madala intensiivsusega valgusega? Kas valgus tundub endiselt käituvat ainult lainena? Või näib sel olevat ka osakeselisi omadusi? Selles õppemoodulis arvutame valguskvandi energia, kasutades selleks Plancki-Einsteini võrrandit. Osakese lainepikkuse arvutamiseks tuginame de Broglie' hüpoteesile. Nii avastame, et laine-osakese dualism on valguse ja mateeria üks põhiomadusi.

V õppemoodul: Vesiniku kiirusjoonte ennustamine kvantmudeliga

Meie teekonna selles punktis oleme juba tuttavad põhimõistetega, mis on vajalikud selliste nähtuste mõistmiseks, mis ei ole seletatavad klassikalise füüsika abil. Lähme tagasi elementide diskreetsete kiirus- ja neeldumisjoonte juurde ning püüame omandatud teadmiste abil neid mitte ainult seletada, vaid ka arvutada välja vesiniku kiirusjoonte sagedused.

Kõik õppemoodulid on kättesaadavad projekti veebilehel www.quantumspinoff.eu.

Soovime teile põnevat teekonda läbi tillukeste asjade füüsika, millel on hiiglaslikud rakendusvõimalused!

Sisukord

1. osa: Milleks kvantfüüsika?

ÕPPEMOODUL I: SELETAMATU NÄHTUS?7

1	Klassikalise mehaanika lõpp	7
2	Trajektooride idee hülgamine: kahe pilu katse	8
2.a	Kahe pilu katse liivaga	8
2.b	Millisest pilust elektron läbi läheb?	8
2.c	Kahe pilu katse lainetega	10
2.d	Kahe pilu katse suurte molekulidega	10
2.e	Kahe pilu katse valgusega	12
3	Elementide kiirgus- ja neeldumisspekter	13
3.a	Keemilise elemendi tüüpilised värvid	13
3.b	Aatomite diskreetsed kiirgusjooned	14
3.c	Diskreetsed neeldumisjooned	16
4	Kuidas diskreetseid spektrijooni seletada?	17
4.a	Kiirendatud elektronid aatomis – valguse allikad?	17
4.b	Kas valguse kiirgamist saab seletada Rutherfordi klassikalise aatomimudeliga?	18
4.c	Rutherfordi klassikalise kiirgava aatomimudeli lõpp	19
5	I õppemooduli mõisted	20

ÕPPEMOODUL II: MIS ON VALGUS? 25

1	Kas valgus koosneb osakeste voost?	25
1.a	Newtoni valgusosakeste teooria	25
1.b	Foucault katse, mis võrdleb valguse kiirust õhus ja vees	27
2	Kas valgus koosneb lainetest?	28
2.a	Christiaan Huygensi oletused	28
2.b	Kuidas saavad valguskiired üksteist läbistada?	29
2.c	Milline ümberpaigutus toimub, kui eraldi lained ühinevad?	29
2.d	Lainefront, lainepikkus, periood	30
2.e	Laine kiirus	31
3	Kuidas Huygens seletas valguse omadusi	32
3.a	Huygensi printsiip	32
3.b	Peegeldumise ja murdumise seletamine laineteooriat kasutades	33
3.c	Difraktsiooni seletamine laineteooria kaudu	33
4	Kahe pilu katse valgusega	35
4.a	Miks ilmnevad kahe pilu katses miinimumid ja maksimumid?	36
4.b	Erinev kaugus, erinev faas	36
5	Difraktsioonivöödid	37
6	II õppemooduli mõisted	38

ÕPPEMOODUL III: MIS VÕNGUB VALGUSEGA? 42

1	Mehaanilised lained	42
1.a	Mehaaniliste lainete allikas	42
1.b	Kas on vaja keskkonda?	42
1.c	Kas levimine ja nihe on sama- või erisuunalised?	43
1.d	Kas osakesed liiguvad piki lainet?	44
1.e	Valguslainete allikas	45
2	Valgus: mis siis ikkagi võngub?	46
2.a	Jõu(väljad), mis suudavad liikuda läbi tühja ruumi	46
2.b	Väljad, mis muutuvad ajas: laineväljad	48
2.c	Elektromagnetlained	49
3	Elektromagnetspekter	51
4	Elektromagnetlainete meri	51
5	Rutherfordi aatomimudeli lõpp	52
6	III õppemooduli mõisted	52

ÕPPEMOODUL IV: OSAKESE-LAINE DUALISM 56

1	Osakese-laine dualism – valguse ja aine fundamentaalne omadus	56
2	Valguse ja materia kvantteooria	57
2.a	Elektromagnetlained ja nende energiakvandid: footonid	57
2.b	Mateerialained ja kvandid	58
3	Kvantväljad	59
3.a	Lainete intensiivsus määrab kvantide tõenäosuse	59
3.b	Osake kui lainepakike	60
3.c	Heisenbergi määramatuse printsiip	62
4	Kvantväljateooria	64
5	IV õppemooduli mõisted	65

ÕPPEMOODUL V: VESINIKU KIIRGUSJOONTE ENNUSTAMINE KVANTMUDELIGA 69

1	Elementide kiirgusspektri ennustamine	69
1.a	Elementide kiirgusjooned: klassikaliselt mõistmata	69
1.b	Materia ja valguse kvantväljad	69
2	Balmeri mõistatuslik valem	70
2.a	Taas Pythagorase täisarvude olemusest	70
2.b	Balmeri valem ja vesinikuspekter	71

3	Lained ja täisarvud: seisulained	72
3.a	Täisarvud ja naturaalsed ülemtoonid	72
3.b	Täisarvud seisulainete lainepikkustes	73
3.c	Täisarv-kordsed naturaalse te toonide sagedustes (Eigeni sagedused)	75
4	Seisvad elektronlained vesinikuaatomis	76
4.a	Lainete sobitamine	76
4.b	Osakese-laine dualism	78
5	Arvutused kvantaatomimudeliga	79
5.a	Vesiniku aatomi suuruse ennustamine	79
5.b	Vesiniku kiirusjoonte ennustamine	80
6	Balmeri valemi tõlgendamine	83
7	Kolmemõõtmelisus – orbitaalid	84
8	V õppemooduli mõisted	86

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



Kasutamine järgmistel tingimustel:

- Autorile viitamine — te peate [kohaselt viitama](#), litsentsi lingi andma ning [näitama ära võimalikud tehtud muudatused](#). Seda võib teha mõistlikul viisil, kuid mitte selliselt, mis võib tekitada väärarusaama, et litsentsiandja tõstab teid või teie poolt teose kasutamist esile.
- Mitteäriline eesmärk — te ei või materjali kasutada [ärilistel eesmärkidel](#).

Te võite:

- jagada — materjali iga meediumi vahendusel ja igas formaadis kopeerida ja levitada
 - kohandada — materjali segada, muuta ja täiendada
- Litsentsiandja ei saa teile seda keelata, senikaua kui järgite litsentsi tingimusi.

Peate sellele tööle viitama järgmiselt:

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



Quantum Spin Off

Tillukeste asjade füüsika, millel on hiiglaslikud rakendusvõimalused

1. osa

Milleks kvantfüüsika?

Kes selle tellis?



Õppemoodul I: Seletamatu nähtus?

1 Klassikalise mehaanika lõpp

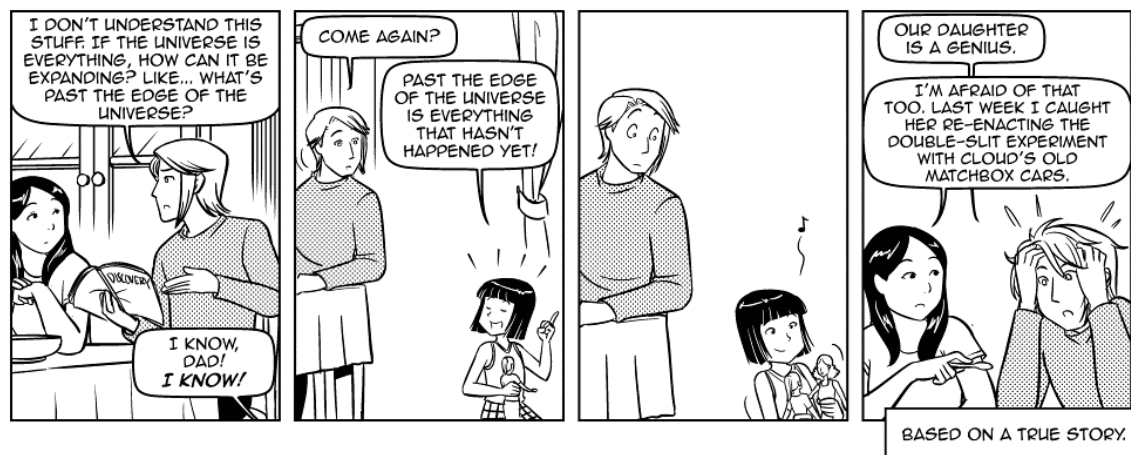
Kui sa lööd palli, siis eeldad, et see järgib täpset trajektoori, mis sõltub selle algsest asukohast, massist ja mõjutavatest jõududest. Samal põhimõttel lennutatakse maalt kosmosesse ka rakette.



Klassikalises mehaanikas, kui on teada massi algne asukoht, algne kiirus ja seda mõjutavad jõud, on võimalik ennustada selle liikumise trajektoori.

Trajektoori ennustamise idee massi algsete tingimuste ja jõudude järgi pärineb Newtonilt, kes formuleeris selle 1687. aastal oma raamatus „Natuurifilosoofia matemaatilised printsiibid“.

Newtoni nn klassikaline mehaanika oli veel kuni 20. sajandi alguseni ilma igasuguse kahtluseta kogu füüsika aluseks. Kui aga füüsikud asusid maailma tillukestes mõõtmetes uurima, sai üha selgemaks, et nn suures maailmas vaadeldavaid trajektoore tegelikult fundamentaalsel tasandil ei eksisteeri – need on kõigest praktiline üldistus fundamentaalsemal tasandil kehtiva mehaanika ehk kvantmehaanika kohta, kus tillukestel kehadel tegelikult kindlaksmääratud trajektooriid puuduvad.



Joonis 1. Matchbox Cars and Quantum Physics
(Allikas: koomiks Sandra and Woo, autorid Knörzer ja Powree, avaldatud litsentsiga Creative Commons Autorile viitamine + Mitteäriline eesmärk + Tuletatud teoste keeld 3.0)

Proovime Sandra eeskujul mõista, mis tegelikult toimub. Seda teeme kuulsa nn kahe pilu katse abil. Maailmakuulus Ameerika füüsik Richard Feynman kirjeldas elektronidega tehtavat kahe pilu katset kui nähtust, „milles peitub kvantmehaanika süda. Reaalsuses sisaldab see ühtainsat müsteeriumi.“ Heidame sellele siis pilgu.

Klassikaline mehaanika:

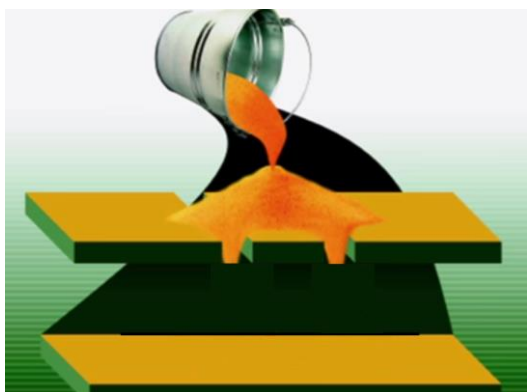
*Kui on teada massi algne asukoht,
algkiirus ja seda mõjutavad jõud,*



saab ennustada massi trajektoori.

2 Trajektooride idee hülgamine: kahe pilu katse

2.a Kahe pilu katse liivaga



Enne kui teeme kahe pilu katse elektronidega, proovime sama katset liivaga. Meil on kaks plaati, üks üleval, teine all. Valame liiva läbi ülemise plaadi, milles on 2 pilu.

Mida näed alumisel plaadil?

Joonista palun tulemus, mida eeldad!

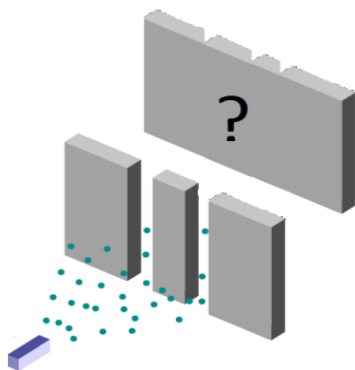
Joonis 1. Kahe pilu katse liivaga (kohandatud professor Jim Al-Khalili loengust Royal Institution'is, vt <https://www.youtube.com/watch?v=A9tKncAdIHQ>)

Kas iga liivateri kulges läbi ühe või teise pilu kindlat rada pidi?
(JAH/EI)

Kas saad öelda, et iga liivateri järgis kindlat trajektoori?
(JAH/EI)

Kas alumisele plaadile moodustunud muster on kõigi liivaterade individuaalsete trajektooride tulemus?
(JAH/EI)

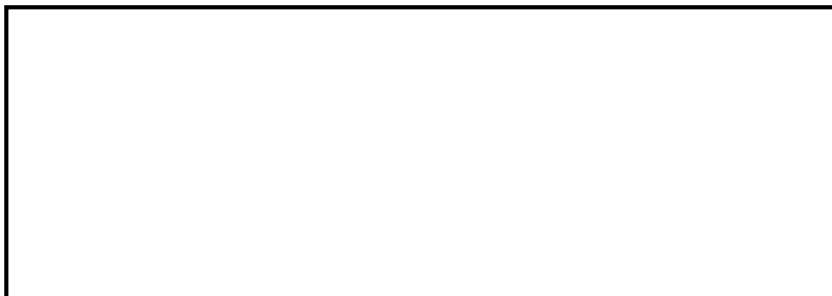
2.b Millisest pilust elektron läbi läheb?



Vaatame nüüd elektrone. Kui tulistad elektrone märklauda pihta, millel on kaks teineteisele lähedal asetsevat pilu, siis mis mustrit võiks näha pilude taga oleval ekraanil?

Joonis 2 Elektronide kahe pilu katse skemaatiline esitus (Allikas: kohandus Wikipedia avalikust domeenist)

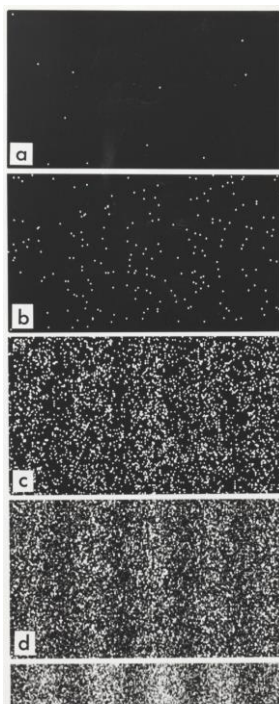
Näiteks võib Newtoni mehaanikas elektrone vaadelda väikeste tindipiiskadena, mis spreipudelilist välja pihustatakse. Pihustades tinti lehele, millel on kaks pilu, ja hoides selle taga ekraani, siis missugune muster ekraanile ilmuks? Joonista, mida sa ekraanil näed:



Elektronide kahe pilu katse tulemusena tavaliselt oodatav muster

Hitachi laborite uurijatel on õnnestunud viia kahe pilu katse läbi elektronidega sellisel, et nad tulistavad elektrone ükshaaval ja salvestavad, kuhu nad ekraanil jõuavad. Seda, kuidas katse tulemusena ekraanil muster moodustub, saab pildiseeriatega ja videona näha siit (inglise keeles):

www.youtube.com/watch?v=oxknfn97vFE.



Vaata seda spetsiifilist mustrit, mille elektronid ekraanil moodustavad: on selge, et teatud kohtadesse koguneb rohkem elektrone kui teistesse. Võrdle uurijate saavutatud lõplikku mustrit enda ennustusega, mille klassikalisel mehaanikal põhinevate teadmistega visandasid. Kas see muster on sama?

(jah/ei)

Kas saad pärast tõelise katse tulemuste nägemist endiselt öelda, et üksik elektron on läbi läinud ühest või teisest pilust?

(jah/ei)

Kas saad rääkida elektroni trajektooriga, ilma et saaksid eeldada, kummast pilust on elektron läbi läinud?

(jah/ei)

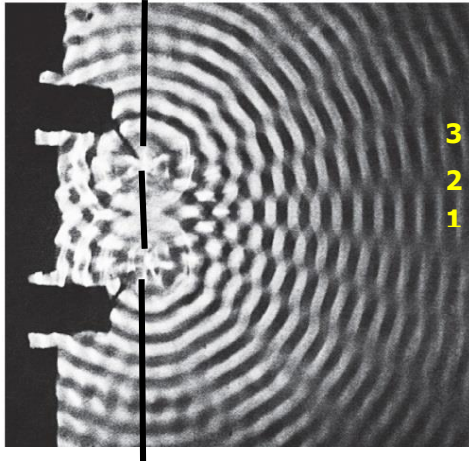
Joonis 3 Mustri moodustumine ekraanile elektronide kahe pilu katse käigus. Tabatud elektronide arv on 100 (b), 3000 (c), 20000 (d), 70000 (e). (Bron: Tonomura, A., Endo, J., Matsuda, T., ja Kawasaki, T. (1989) Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern, American Journal of Physics 57 (2), 117–120)

Täpse trajektoori ja asukoha ideed tunduvad hääbuvat. Klassikalisest mehaanikast seletuse andmiseks enam ei piisa. Vaata ka dr Quantum¹ multifilmi (inglise keeles): www.youtube.com/watch?v=DfPeprQ7oGc

¹ Dr. Quantumi video näitab, kuidas elektron pilude ees kaheks „lõheneb“: see pole kvantfüüsikas tegelikult tõene! Mitte aine, vaid elektroni laine läbib mõlemad pilud ja interfereerub iseendaga. Tuleme selle juurde hiljem tagasi.

Elektronid jõuavad ükshaaval ekraanile, kuid pole võimalik öelda, millisest pilust nad läbi läksid. Kas elektronid polegi siis enam aineosakesed?

2.c Kahe pilu katse lainetega



Vaadeldgem kahe pilu katset veelainetega klassikalises mehaanikas (vt pilti). Laineharjad on selged, lainepõhjad tumedad, tasased alad hallid.

Joonis 4 *Veelainete interferents* (Bron: *PSSC Physics Haber-Schaim, Dodge, Gardner, Shore. Kendall/Hunt, 1991*)

Kas on alasid, kus häiritust ei esinegi? (jah/ei)

Kus sa näed laineharju ja lainepõhju? Kirjuta üles vastavate alade numbrid:.....

Kus sa näed tasaseid alasid?

Vöödilist mustrit, kus teatud kohtades on lained ja teistes pole, nimetatakse **interferentsimustriks**. Sellise mustr moodustumine on lainetele tüüpiline. Muster tekib, kuna kohtades, kus kohtuvad kaks laineharja või -põhja, tekivad kõrged lained. Seevastu aga kohtades, kus kohtuvad lainehari ja -põhi, kustutavad nad teineteist. Nendes kohtades laineid enam ei ole. Tuleme selle juurde tagasi II õppemoodulis „Mis on valgus?“.

Tuleme tagasi elektronidega tehtava kahe pilu katse tulemuste juurde ja võrdleme neid lainetega tehtava katse tulemustega. Kas näed ekraanil elektronide tekitatud vöödilist interferentsimustrit? (jah/ei)

Seega: kas saame öelda, et elektronid käituvad ka lainetele omaselt? (jah/ei)

Elektronid saavad ükshaaval, kuid nende moodustatav muster on elektronide laineomaduste tõttu interferentsimuster!

2.d Kahe pilu katse suurte molekulidega

Kuna elektronid on üliväikesed osakesed, võiks arvata, et osakese-laine dualism kehtib üksnes nende puhul.

Kas arvad, et elektronide käitumine on omane ainult neile, või moodustavad ka suuremad molekulid kahe pilu katses sarnase interferentsimustrit?

.....

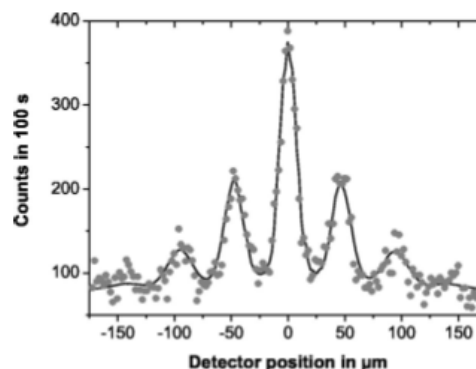


Joonis 5 *Fullereeni C₆₀ molekul on maailma kõige väiksem jalgpall (allikas: O. Nairz, M. Arndt ja A. Zeilinger, "Quantum interference experiments with large molecules")*

Kahe pilu katsed on läbi viidud ka **fullereeni molekulidega**, C_{60} , mida kutsutakse inglise keeles ka **“bucky balls”**. Need molekulid koosnevad 60 süsinikaatomist, mis on ühendatud jalgpalli kuju meenutaval viisil. Fullereeni molekuli võib seega kutsuda molekulaarseks jalgpalliks, olles selliselt maailma kõige väiksem jalgpall. Katse tulemust näete joonisel 6.

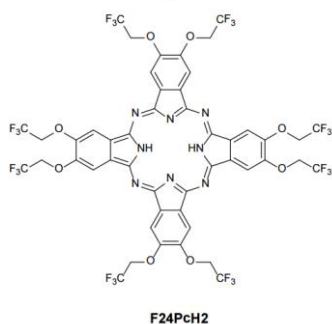
Kas elektronid on isemoodi või osakese-laine dualism on kõikide aineosakeste põhiomadus?

.....



Joonis 7 Fullereeni interferentsimuster (allikas: O. Nairz, M. Arndt ja A. Zeilinger, "Quantum interference experiments with large molecules")

Mida suuremaks „asjad“ muutuvad, seda väiksemad on nende lainepikkused (tuleme selle juurde tagasi de Broglie' võrrandiga IV õppemoodulis). Seetõttu muutub katsete läbiviimine üha raskemaks (vaja on väiksemaid pilusid suuremate „asjade“ paremaks eraldamiseks).

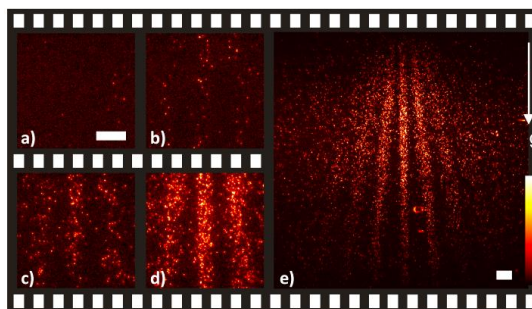


Hiljuti tehti kahe pilu katse suurte värvimolekulidega, mille massid olid 500 kuni 1000 korda suuremad kui süsinikul. Ka rasked massiivsed molekulid interfereeruvad lainele omaselt ja moodustavad ekraanile molekuli kaupa mustri.

Sellised katsed ei demonstreeri mitte ainult laine-osakese dualismi, vaid aitavad ka uurida, kust jookseb piir klassikalise füüsika ja kvantfüüsika vahel.

Vaata lühikest filmi „Quantum Molecular Movie“:

www.nature.com/nnano/journal/v7/n5/extref/nnano.2012.34-s3.avi.



Joonis 8 Suurte värvimolekulide interferentsimuster, kaadrid filmist „Quantum Molecular Movie“. (Juffmann, T., Milic, A., Müllneritsch, M., Asenbaum, P., Tsukernik, A., Tüxen, J., ... & Arndt, M. (2012). Real-time single-molecule imaging of quantum interference. *Nature nanotechnology*, 7(5), 297-300)

Kvantmehaanika algusaastatel varasel 20. sajandil näisid seesugused laine-osakese omadused väga teoreetilised. Nüüdseks on need aga paremini katseliselt vaadeldavad.

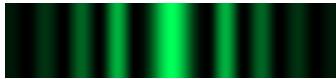
Selliste katsete tegemiseks vajalik väga peen tehnika aitab ka kaasa nanotehnoloogiliste seadmete arengule, mis võib tuua palju kasu näiteks kvantarvutite väljatöötamises või

meditsiinis. See on näide selle kohta, kuidas alusuuringud loovad inimkonnale uusi teadmisi ja võimalusi.

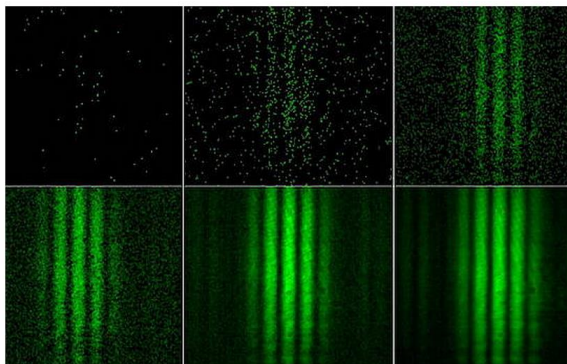
Niisiis – mida me peaksime järelutama? kas elektron on midagi „erilist“ või on laine-osakese dualism kogu materiaa fundamentaalne omadus?

.....

2.e Kahe pilu katse valgusega



Kui me nüüd teeme kahe pilu katse valgusega, ei juhtu esmapilgul midagi erilist: näeme ekraanil võõralist musterit, milles mõnes kohas on valgus ja mõnes mitte. Niisiis näib, et valgus on laine (tuleme selle juurde tagasi II õppemoodulis „Mis on valgus?“).



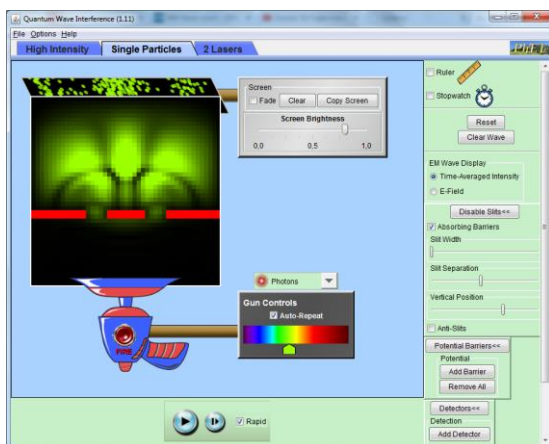
Kuid kui valguse intensiivsust oluliselt tõsta, näeme, et valgus – mida pidasime laineks – jõuab kohale väikeste valguspallikestena. Neid pallikesi nimetatakse footoniteks.

Joonis 9 Kahe pilu katse valgusega: valgus saabub kohale footoni kaupa. Vähehaaval moodustub difraktsioonimuster. Kujutis on tehtud footoneid jäädvustava kaameraga (A. Weis, Fribourg'i ülikool).

Seega ei paista klassikalise mehaanika maailmapildiga midagi valesti olevat. Tillukesed kehad, nagu elektronid ja molekulid, millest mõtleme kui pallikestest, moodustavad interferentsimustri nagu lained. Valgusel jällegi on interferents nagu lainetel, kuid saabub kohale osakese kaupa.

Selline **laine-osakese dualism** on üks loodusteaduste põhimõisteid, mis tuli kasutusse koos kvantmehaanikaga ja esitas väljakutse klassikalisele mehaanikale. Kvantmehaanikat iseloomustab teatud fundamentaalne trajektoori määratus. Tuleme selle juurde tagasi IV õppemoodulis „Osakese-laine dualism“.

Harjutus rakendusega:



Saad mängida kahe pilu katse simulatsiooniga.

Püüa paika panna seaded footonitega tehtava kahe pilu katse jaoks. Parimad tulemused saad, kui tulistad kordusega („repetition“). Selge interferentsimustri saamiseks tuleb sul võib-olla reguleerida pilude eraldust ja laiust.

Allikas: Colorado ülikool, Boulder phet.colorado.edu/en/simulation/quantum-wave-interference

Vasta järgmistele küsimustele:

1..... Kas kõrge intensiivsusega valguskiirt vaadeldes saad seletada tekkivat mustrit klassikalise laineteooria abil? (jah/ei, sest)

2..... Kas footoniga tehtava kahe pilu katse puhul saad seda seletada klassikalise teooriaga või vajad kvantteooriat? (jah/ei, sest)

Kahe pilu katse elektronidega:

1..... Kas kõrge intensiivsusega elektronikiirt vaadeldes saad seletada tekkivat mustrit klassikalise laineteooria abil? (jah/ei, sest)

2..... Kas elektroniga tehtava kahe pilu katse puhul saad seda seletada klassikalise teooriaga või vajad kvantteooriat? (jah/ei, sest)

3 Elementide kiirgus- ja neeldumisspekter

Laine-osakese dualism ja tillukeste kehade trajektoori kadu on kvantmehaanika üks uusi mõiste, mis vastandab seda klassikalisele mehaanikale. Vaatame, kas see tillukeste kehade mehaanika aitab meil ka seletada molekulide selliseid omadusi, mida klassikalise füüsika seletada ei suutnud.

3.a Keemilise elemendi tüüpilised värvid

19. sajandi lõpuks oli juba laialt teada, et keemilised ained kiirgavad kuumutades neile omaseid värve. Hoides keemilise aine näidist leegis, näete, milline värv on sellele ainele tüüpiline.



Joonis 6 Kui hoida naatriumit (Na) leegis, kiirgab see kollast värvi. Kui teha sama vasega (Cu), kiirgab see sinist värvi.

€

e

da efekti võib kasutada keemilise aine äratundmiseks!

Korralda mõned testid leekidega.

How to Conduct a Flame Test

with Dr. Anne Marie Helmenstine



Videos „Kuidas läbi viia leegitesti“ õpetatakse katset tegema (inglise keeles):

video.about.com/chemistry/How-to-Do-a-Flame-Test.htm

Vajadusel võite oma keemiaõpetajalt abi küsida. Viige läbi leegitesti. **Kuidas on võimalik, et iga keemiline aine kiirgab just talle omast värvi?** Kirjutage allolevasse tabelisse üles, millist keemilist ainet kasutasite ning millist värvi ta kiirgas.

Keemiline aine	Leegi värv

Keemiliste ainete kiiratavaid tüüpilisi värve näeb veelgi paremini **gaaslahenduslambiga**. Need lambid on läbipaistvad torud, mis on täidetud spetsiaalse gaasiga. Kui rakendada lambitoru otsa elektripinget, läheb lamp põlema ning kiirgab torus oleva gaasi tüüpilist värvi.

Naatriumlambid on tihtipeale kasutusel autoteedel, kuna need kiirgavad naatriumile omast kollast värvi. *Elavhõbedalampe* võib nt näha autode esituledes, andes elavhõbedale omast valget-sinist värvust.



Kiirgusjooni näed spektromeetriga. Ehk leidub mõni teie füüsikalaboris või siis saad selle ise ehitada (vaata juhiseid XI õppemoodulist).

3.b Aatomite diskreetsed kiirgusjooned

Kui kuumutate keemilist ainet leegis või kui panete põlema gaasilahenduslambi, milles on gaasiline keemiline element, saate jälgida kasutatud ainele omast värvi. Leegis või gaasilahenduslambis olev naatrium kiirgab alati identset kollast värvi. Kui ainet kuumutada leegis või panna gaasilahenduslambis pinge alla, lõhenevad selle molekulid ning tulemusena läheb aine **aatomilisse olekusse**.

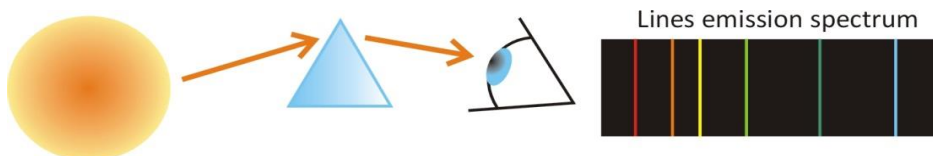
Aga siis peavad ju aatomid olema need, mis ainele omaseid värve kiirgavad!

Küsimus, millele füüsikud 19. sajandi lõpus ja 20. sajandi alguses vastest otsisid, oli:

Kuidas saab aatom sedavõrd täpseid värve kiirata?

Selleaegsed füüsikud ei osanud kindlasti arvata, et vastus sellele küsimusele juhib neid täiesti uue füüsikani: kvantfüüsikani! Neis õppemoodulites käime Sinuga koos seda rada. Me avastame, et klassikaline füüsika ei kehti enam aatomiskaalal ning tõusetub ainete fundamentaalselt uue käitumise küsimus. Seda käitumist polnud me ja kõik füüsikud kuni 20. sajandini tähele pannud.

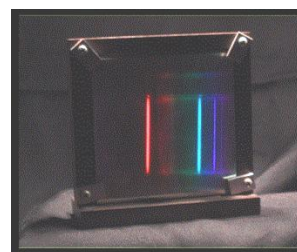
Meie otsing algab kiirgusspektri iseloomulikest värvidest. Prisma või difraktsioonivõre abil saame valgust murda ja näha, mis värvid selles moodustuvad. Difraktsioonivõre on diafragma, millesse on lõigatud väga palju paralleelseid õhukesti lõhesid.



*Joonis 7 Aatomiline gaas emiteerib valgust, mida saab prisma või difraktsioonivõre abil murda selle moodustavatesse värvidesse. Sel viisil on näha, et jälgitav värv koosneb tegelikult **diskreetselt arvust** teravatest värvijoontest. Need diskreetsed kiirgusjooned on tüüpilised lambis olevale elemendile.*

L

Näiteks võime otsida vesiniku kiirgusspektrit. Vesinik on Mendelejevi tabelis esimene element ning kõige lihtsam ja levinum element universumis. Kui teie kooli füüsikalaboris on vesiniku gaasilahenduslamp ja spektroskoop, võiksid kiirgusspektri oma silmaga üle vaadata! Küsi oma füüsikaõpetajalt abi!



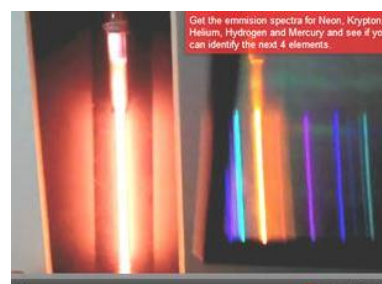
*Joonis 8 Aatomilisele **vesinikule** omane joonspekter koosneb kolmest tervast joonest: punasest, sinisest ja violetsest.*

V õppemoodulis saad sarnaselt kvantfüüsika suurtele isadele Niels Bohrile ja Louis De Broglie'le *ennustada kiirgusjoonte lainepikkust*, ja seda 4 komakoha täpsusega!

i) Määratle elemendid neljas eri gaasilahenduslambis

Järgmises videos murtakse neljas eri elementidega täidetud gaasilahenduslambis tekkiv valgus difraktsioonivõre abil seda moodustavatesse värvidesse.

Uurige neoni, krüptooni, heeliumi, vesiniku ja elavhõbeda kiirgusspektreid. Võrrelge neid kiirgusspektreid eri lampide spektritega. Otsustage seejärel, milline keemiline aine on igas lambis.



Joonis 9 Aatomispekter – nimeta see element
www.youtube.com/watch?v=1qT7hYvKq0&feature=related

Lamp	Mis element on selle sees?
1	
2	
3	
4	

ii) Analüüsi valgust, mida kiirgavad tähed

Mõõtes päikese ja teiste **tähtede** spektrit, võib märgata peamiselt jooni, mis on omased elementidele H ja He. Sellest saame teada, et tähed koosnevad peamiselt vesinikust ja heeliumist. Nende spektrite edasine uurimine annab meile teavet ka tähtede vanuse ja isegi nende liikumise kohta.



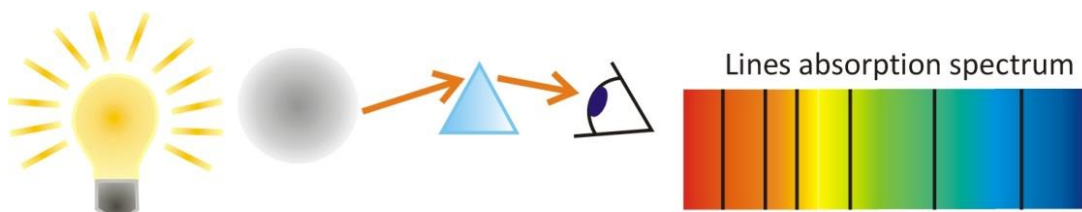
Vaadake videot „Tähtede spekter” siit (inglise keeles): www.youtube.com/watch?v=l4yg4HTm3uk

Aatomid kiirgavad kindlaid diskreetseid kiirgusjooni, mis võimaldavad meil näha valgusaastate kaugusel olevate tähtede keemilist koostist. Kuid võimalik on ka vastupidine: aatomiliste gaaside pilved võivad valgust neelata. Need aatomilised pilved neelavad neist läbivast valgusest ainult spetsiifilisi diskreetseid spektrijooni.

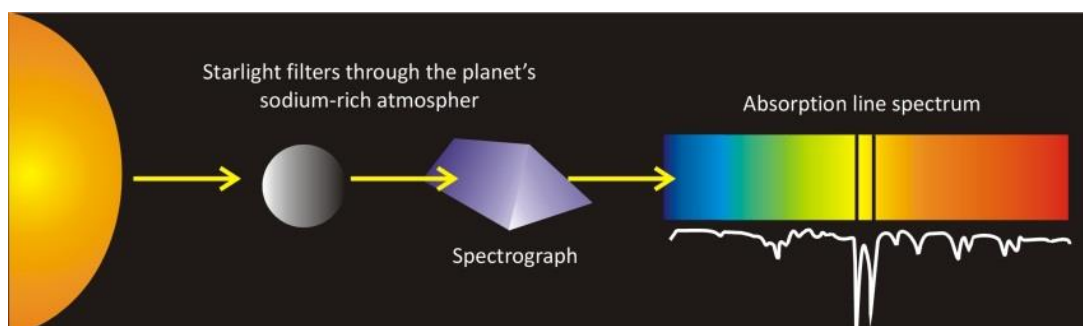
3.c Diskreetsed neeldumisjooned

Kui tähelt tulev valgus läbib teel vaatlejani külma gaasipilve, võib pilv teatud värvid endasse neelata. Selle tulemusena näeb vaatleja tähe spektris mustade neeldunud kiirte seeriaid. Neid jooni kutsutakse neeldumisjoonteks ja vastavat spektrit neeldumisspektriks.

Neeldumisspektri analüüsi tulemusena selgub, milliseid keemilisi elemente gaasipilv sisaldab.



Joonis 10 Kui „valge” valgus läheb läbi aatomilise gaasi, blokeerib gaas teatud värvijooned, mis kunagi vaatlejani ei jõua. Gaasis oleval aatomil neelavad teatud värvid ning need kaovad gaasi poolt emiteeritavate värvide hulgast. Selle tulemusena näeb vaatleja **diskreetset** neeldumisspektrit.



Kvantfüüsika: teadus väga väikestest osakestest, mil on lai rakendusala

Näiteks on võimalik määratleda planeedi atmosfääris olevad keemilised elemendid, mõõtes selle planeedi atmosfääri läbiva päikesevalguse neeldumisspektrit.

Spetsiaalsete värvijoonte valguse neeldumine toimub siis, kui valguse on neelanud kindel element:

Kiirgus- ja neeldumisspekter näitavad kindlate aatomite või molekulide olemasolu.

4 Kuidas diskreetseid spektrijooni seletada?

4.a Kiirendatud elektronid aatomis – valguse allikad?

Teame nüüd, et aatomid kiirgavad diskreetseid spektrijooni. Kuid miks? Oleme tagasi oma küsimuse juures:

Kuidas saab aatom selliseid kindlaid värve kiirata ja neelata?

Sellele küsimusele tuleb vastust otsida eelkõige aatomist endast.

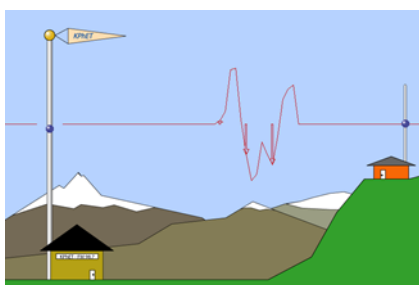
Kuidas saab aatom valgust **kiirata**?

Kuidas saab aatom valgust **neelata**?

19. sajandi lõpus avastati, et valgus on elektromagnetlaineline.

Antennid:

Kiirendatud laeng antennis saadab välja elektromagnetlainet. Kas sel juhul ei tundu mõistlik pidada elektrone – kiirendatud laenguid aines – vastutavaks aimest välja kiirguva valguse eest?



Seega võivad valguse allikaks olla liikuvad, täpsemalt väljendudes kiirendatud elektronid.

Elektronid on tõepoolest aatomis liikuvad laengud. Neid võib vaadata kui n-ö aatomsaatjaid. Oma liikumise tõttu saadavad nad välja võnkuvat elektromagnetlainet – valgust.

Proovi raadiolainete teemalist rakendust: phet.colorado.edu/en/simulation/radio-waves

Joonis 6 Võnkuma pandud laeng antennis saadab välja elektromagnetlainet. Kas sel juhul ei tundu mõistlik pidada elektrone – laengute võnkumisi aines – vastutavaks aimest välja kiirguva valguse eest? (Phet'i rakendus, Colorado ülikool, Boulder)

Seega saab klassikaline füüsika anda valguse kiirgamisele aatomite poolt sellise üldise seletuse: valguse kiirgamine on aatomis väga kiiresti võnkuvate elektronide tagajärg.

4.b Kas valguse kiirgamist saab seletada Rutherfordi klassikalise aatomimudeliga?

Kas klassikaline füüsika oskab seletada, miks saab aatom diskreetseid spektrijooni kiirata või neelata?

Kuidas on elektronide liikumine aatomites nii täiuslikult korraldatud, et kiiratakse vaid teatud värvusega diskreetseid spektrijooni?

Selle teada saamiseks peame lähemalt uurima Rutherfordi klassikalist aatomimudelit. Rutherfordi aatomimudel oli viimane klassikaline aatomimudel enne kvantmehaanika teket.

i) **Visanda Rutherfordi klassikaline planetaarne aatomimudel:**

ii) **Vaata järgi, mis perioodil Rutherford Cambridge'is töötas:**

Oled kindlasti tuttav Rutherfordi aatomimudeliga: elektronid tiirevad ümber aatomituuma nagu planeedid ümber Päikese.

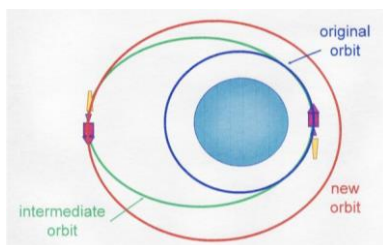
Kas teadsid ka seda, et punase valguse (mis on madalama sagedusega) kiirgamiseks peaks elektron liikuma aeglasemalt, sinise valguse (mis on suurema sagedusega) kiirgamiseks peaks elektron liikuma kiiremini. Elektroni spetsiifiline ringikujuline liikumine põhjustab kindla värvi.

Näiteks vesiniku aatomil, mille puhul on teada, et sel on kolm kindlat teravat kiirgusjoont, peaks olema ka kolm vastavat elektroniorbiiti, millel elektron liigub kolme erineva ja väga kindla kiirusega – nii saaks seletada punast, türkiissinist ja sinist joont.

Kas sinu arvates on võimalik, et vesiniku aatomis liigub elektron ümber tuuma kolmel erineval orbiidil ja kolme erineva kiirusega, et tekitada need kolm erineva värvusega joont? (jah/ei)

Kui vastus on jah, siis miks peaks elektron nii tegema?

Satelliidid orbiidil:



Ka Maa ümber tiirlevaid satelliite saab viia „kõrgemale“ või „madalamale“ orbiidile, kui lisada või vähendada energiat. Ehk kehtib siis sama ka aatomis liikuva elektroni kohta. Ka elektron liigub kõrgematele orbiitidele ja tagasi, et kiirata „vajalikke“ jooni.

Kuid siiski jääb küsimus:

Miks peaksid olema lubatud üksnes mõned orbiidid, need, mida seostatakse jälgitava valguse kiirgusjoonte sagedustega?

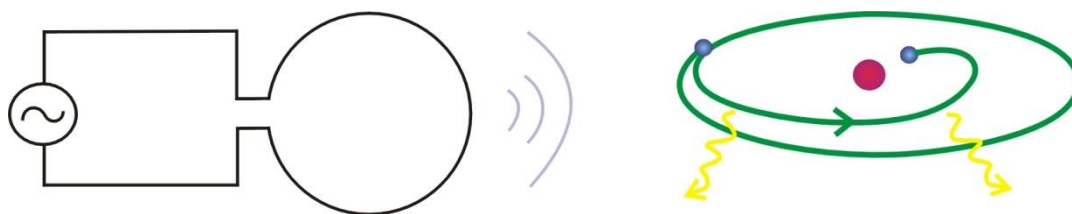
Kuid klassikalises teoorias on lubatud kõikvõimalikud energiad ning tiirlev elektron võib kiirata valgust kõikvõimalikel sagedustel, ning seega kõikvõimalikes värvides.

Kas vesiniku aatom kiirgab kõikvõimalikes värvides valgust? (jah/ei)

Kuid lisaks sellele on klassikalise aatomimudeliga üks veel suurem probleem.

4.c Rutherfordi klassikalise kiirgava aatomimodeli lõpp

Mis veelgi halvem, klassikalises aatomimodelis (nagu Rutherfordi omas) kiirgab tiirlev elektron elektromagnetlainet pidevalt – täpselt nagu vahelduvvooluga antenn.



Joonis 11 Just nagu antenni sees olevad vahelduvvoolu elektronid saadavad pidevalt välja elektromagnetlainet, peaks ka aatomi tuuma ümber tiirlev elektron elektromagnetlainet välja saatma. Niels Bohr mõistis, et sellisel juhul peaks elektron pidevalt energiat kaotama ning selle tulemusena tuuma peale kukkuma. Klassikalise füüsika kohaselt ei saaks stabiilsed aatomid lihtsalt eksisteerida. Ning elektrone, mis tiirlevad täpselt ja ainult paaril diskreetsel sagedusel ning mida seostatakse jälgitavate kiirgusjoontega, ei saaks klassikalises füüsikas mingil juhul modelleerida. (Joonise allikas: EDN, märts 2000)

Kuid kui antenni lisatakse pidevalt energiat, siis aatomisse keegi energiat juurde ei pane. Seega – kust tuleb energia, mida liikuv elektron elektromagnetlainetena välja saadab?

....

Seega – mis juhtuks tiirleva elektroniga?

....

Aatomi kiiravad elektromagnetlained saaksid esineda ainult tiirlevate elektronide liikumise energia arvelt. See tähendab, et tiirlevad elektronid kaotaksid elektromagnetvälja kiirates energiat.

Taani füüsik Niels Bohr mõistis, et elektronid, kaotades valguse emiteerimisel pidevalt energiat, kaotaksid orbiidil tiireldes ka kiirust ning kukusid väga lühikese ajaga otse tuuma peale. Teisisõnu sai Bohr aru, et planetaarne aatom koos tiirlevate elektronidega ei saa füüsiliselt üldse eksisteerida. Kuid me ju eksisteerime – kuidas see siis võimalik on

Rutherfordi klassikaline planetaarne aatomimudel ei ole loogiline ning materia ei saaks eksisteerida.

Klassikaline füüsika ei saa seletada keemiliste elementide kiirgus- ja neeldumisjooni.

UNIVERSITY OF COPENHAGEN | Dansk | Shortcuts | Search

BOHR 2013

- Home
- Events and Exhibitions
- Book publishing
- Film and TV
- School Projects

BOHR 2013
The 100-year anniversary of the Niels Bohr's atomic model

On the occasion of the 100th anniversary of Niels Bohr's atomic model, the Niels Bohr Institute, Niels Bohr Archive and several other institutions are planning a series of events, exhibitions, new books, films, TV and school projects in 2013.

2013 is the 100-year anniversary of Niels Bohr's revolutionary atomic model, which formed the basis for our understanding of atoms and for the quantum revolution.

Using quantum mechanics, we have been able to predict many of the properties of matter, which were later used in a multitude of devices that changed the world and revolutionized...

Gallery: Pictures of Niels Bohr

Niels Henrik David Bohr

Kalender - det sker i 2013

Udstilling på Energimuseet: Fra 23/3 - 01/11 2013: Et kvantespring til fremtiden - Niels Bohrs atommodel 100 år. 22-03-2013

2013. aastal sai täpselt 100 aastat sellest, kui Bohr tuli välja esimese kvantmehaanilise aatomimudeliga – nn Bohri aatomimudeliga.

Joonis 12 Heisenberg ja Bohr Kopenhaagenis 1934 . a
(Allikas: AIP, Ameerika Füüsikainstituut, foto autor Paul Ehrenfest).



Järgmistes õppemoodulites püüame koos aru saada, kuidas aine valgust kiirgab ja kuidas see kvantmehaanika abil seletatav on – klassikaline mehaanika ega klassikaline elektromagnetism valguse ja aine käitumist seletada ei suuda. Seepärast arenes tasapisi välja Newtoni mehaanikast sügavam teooria – kvantmehaanika. V õppemoodulis saad sarnaselt kvantfüüsika suurtele isadele Niels Bohrile ja Louis De Broglie'le ennustada kiirgusjoonte lainepikkust, ja seda 4 komakoha täpsusega!

Järgmises peatükis alustame oma otsingut küsimusega: **mis on valgus?**

5 I õppemooduli mõisted

Kirjuta lünkadesse puuduvad mõisted!

Klassikalise füüsika mõisted

Kui on teada massi algne asukoht, algkiirus ja seda mõjutavad jõud,

.....

Klassikaliste lainete interferentsimuster (nt kahe pilu katse veelainetega)

Kiirendatud elektron kui kiirendatud laetud osake tekitab
See kehtib ka elektronide kohta aatomis: kuna nad on kiirendatud osakesed, kiirgavad nad valgust.

Rutherfordi aatomimudel

Kvantfüüsika mõisted

Osakestel ei ole kindlaid trajektoore.

Kõigil osakestel, nagu näiteks elektronidel, on loomus.

..... on aine fundamentaalne omadus.

Aatomid kiirgavad ja neelavad spektrijooni, mis on iseloomulikud sellele elemendile. See on seletatav Bohri aatomimudeliga.