

LUKIOFYSIIKAN KOKEELLISUUS

Ari Hämäläinen

Helsingin yliopisto, Fysiikan laitos

Tiivistelmä *Kokeellisena luonnontieteenä fysiikan opetuksen pitää pohjautua kokeellisuuteen. Nykyisin tämä tiedostetaan opetussuunnitelman perusteissa ja oppikirjoissa, mutta ei välttämättä aina käytännön opetustyössä. Uudessa lukion opetussuunnitelmassa kokeellisuus edelleen korostuu. Kokeellisen osaamisen testaamiseen ylioppilaskokeessa on ollut tähän asti sangen rajatut mahdollisuudet. Tämä tulee muuttumaan kun koe sähköistyy, joten nyt viimeistään kokeellisuus pitää ottaa lukiofysiikan opetuksen erottamattomaksi osaksi.*

Tärkeintä on että oppilaat ylipäänsä altistuvat kokeellisuudelle. Resurssien mukaan kokeellisuus voi olla oppilastöitä, demonstraatiota tai kerrottua empiriaa. Jokaisen kokeen merkitys pitää käydä oppilaalle selväksi. Merkityksiä luova kokeellisuus luo uusia käsitteitä; siis esimerkiksi uudet suureet otetaan käyttöön kokeiden avulla. On huomattava että perinteinen ennusteita testaava kokeellisuus ei opeta uutta fysiikkaa.

Artikkelissa esitellään uuden OPS:n mukaisiin seitsemään lukiofysiikan kurssiin liittyvät keskeiset kokeet. Lähes kaikki kokeet ovat merkityksiä luovia, eli niiden avulla rakennetaan kokonaisuuden keskeiset käsitteet. Uudet käsitteet rakentuvat aina olemassa olevien pohjalle, kuitenkin koulutodellisuus ja käsitteiden prosessiluonne huomioiden.

1. JOHDANTO

Fysiikka on kokeellinen luonnontiede, joten se opettamisenkin pitää pohjautua kokeellisuuteen. Nykyisin tämä tiedostetaan sekä opetussuunnitelmassa että oppimateriaaleissa, mutta käytännön opetuksessa kokeellisuus ei aina toteudu, monista syistä. Kuitenkin uudistuva lukion opetussuunnitelma sekä sen mukaisen oppimisen toteutumista testaava, sähköistyvä ylioppilaskoe asettavat lukiofysiikan opetuksen väistämättömän eteen. Enää kokeellisuus ei ole vain opetuksen toivottava lisäpiirre, vaan sen välttämätön osa. Ilman kokeellisen työskentelyn, tulosten esittämisen ja tulkinnan taitoja ei ylioppilaskokeessa tulevaisuudessa enää voi menestyä.

2. KOKEELLISUUDESTA

Seuraavassa joitakin teesejä, joiden pohjalle käsitykseni kokeellisuuden merkityksestä ja toteutuksesta rakentuvat. Käsityksien taustalla ovat Kurki-Suonion ja Kurki-Suonion (1994) esittämät ajatukset.

Tärkeämpää kuin yksittäiset kokeet on se että kokeita yleensä tehdään. Jatkossa esitellään joukko eri lukiokursseihin liittyviä, mielestäni oleellisia kokeita. Kuitenkaan mikään niistä sinänsä ei ole niin ratkaisevan tärkeä, että kokeen pois jättäminen väistämättä romahduttaisi käsitteenmuodostusprosessin. Tärkeämpää on kokeellisuuden yleisten periaatteiden omaksuminen.

Jokaisella kokeella täytyy olla merkitys, jonka pitää käydä selväksi myös oppilaille. Sekä opettajalle että oppilaille pitää olla selvää, miksi koe tehtiin: mitä uutta tiedetään ja osataan kokeen jälkeen. Jos merkitys ei ole selvä, kokeeseen käytetty aika on mennyt hukkaan.

Uusia merkityksiä luovat kokeet ovat tärkeämpiä kuin ennusteita testaavat kokeet. Merkityksiä luova koe luo uuden käsitteen, kuten uuden suureen, tai luo uuden yhteyden olemassa olevien käsitteiden välille. Tällainen koe siis opettaa uutta fysiikkaa. Ennustetta testaava koe ei opeta uutta. Parhaassa tapauksessa siinä todella testataan olemassa olevan lain paikkansapitävyyttä määrättyssä tilanteessa, mikä on hyvin hyödyllistä, mikäli kyseessä on aito testaus. Mutta useinkaan ennusteita testaavassa kokeessa ei aidosti haasteta lakia, vaan yritetään saada aikaan mahdollisimman tarkkaan lain ennusteen mukaiset tulokset. Tällainen koe opettaa mittaus- ja tulostenkäsittelytekniikkaa, mutta fysiikasta se ei paljasta mitään uutta.

Epäonnistunutta koetta ei ole. Kaikesta oppii jotain. Opettajalle yksi syy välttää kokeiden tekemistä saattaa olla pelko niiden epäonnistumisesta. Eli toivottua ilmiötä ei saada näkyviin, tai mittaustulokset eivät ole etsittävän tai testattavan lain mukaisia. Kokeet tulisi toki aina harjoitella ja laitteet testata etukäteen, mutta parhaasta valmistautumisesta huolimatta jotain voi mennä pieleen. Kuitenkin, tällöinkin oppilaat näkevät millaisella koejärjestelyllä ilmiötä tutkitaan, ja puuttumaan jäävät tulokset voi paikata kerrotun empirian ja mielikuvituksen keinoin, joten lopulta ”epäonnistuneesta” kokeesta voi oppia hyvinkin paljon. Myös sen että kokeellinen fysiikka nyt vain on luonteeltaan sellaista, että aina joskus asiat eivät suju suunnitelmien mukaan. Se ei ole katastrofi.

3. KOKEELLISUUDEN ULOTTUVUUDET

Yksi este kokeellisuuden toteuttamisen tiellä saattaa olla rajoittunut käsitys sen luonteesta. Kuitenkin koulufysiikan kokeellisuus voi saada monia muotoja.

Merkityksiä luova koe ↔ ennusteita testaava koe

- Merkityksiä luova koe luo uusia käsitteitä ja yhteyksiä.
- Myös ennusteita testaavia kokeita tarvitaan, mutta yksinään ne eivät riitä.

Kvalitatiivinen koe ↔ kvantitatiivinen koe

- Käsitteet syntyvät kvalitatiivisina (oliot ja ilmiöt, niiden ominaisuudet), joten kvalitatiiviset kokeet ovat tärkeitä! Niitä pitää tehdä kaikilla opetuksen tasoilla.
- Suureet kuvaavat ominaisuuksia kvantitatiivisesti. Jokaisesta suureesta täytyy ymmärtää, minkä olion tai ilmiön mitä ominaisuutta suure kuvaa. Ilman tätä ymmärrystä suure on merkityksetön!

Oppilastyö ↔ opettajan demonstraatio ↔ kerrottu empiria

- Itse tehty tutkimus opettaa parhaiten, mutta vaatii paljon aikaa ja resursseja.
- Demonstraation haasteena on saada mielenkiinto säilymään, ja oppilaat havaitsemaan oleellinen.
- Kerrottu empiria: jos koetta ei opetustilanteessa pysty tekemään, käsitteenmuodostus voi silti olla empiiristä kun kokeet, tulokset ja johtopäätökset kuvataan niin että oppilaat saavat niistä realistisen käsityksen (video, simulaatio, kirjallinen materiaali...).

4. UUDISTUVAT VAIKUTTAJAT: OPS JA YO-TUTKINTO

4.1 Lukion uuden opetussuunnitelman perusteet

Lukio uusi OPS (Opetushallitus, 2015) siirtää selkeästi tavoitteiden painopistettä sisällöistä prosesseihin, ja samalla teorian opiskelusta havainnoista oppimiseen ja kokeellisuuteen. Poimintoja:

”Opiskelijoiden aikaisemmat kokemukset, uudet havainnot ja näkökulmat muokkautuvat [...] johdonmukaiseksi kokonaisuudeksi kohti fysiikan teorioiden mukaista käsitystä ympäröivästä todellisuudesta.”

”Fysiikan opetuksen lähtökohtana ovat ympäristöstä tehdyt havainnot.”

”Tutkimusten tekemisellä on oleellinen merkitys käsitteiden omaksumisessa ja ymmärtämisessä, tutkimisen taitojen oppimisessa ja luonnontieteiden luonteen hahmottamisessa.”

4.2 Ylioppilastutkinnon sähköistäminen

Sähköistämisen myötä fysiikan ylioppilaskoe vapautuu neljän A4-sivun vankilasta. Tästä seuraa, että tehtävissä voidaan antaa sähköisessä muodossa analysoitavaksi paljon entistä laajempia aineistoja. Ne voivat olla mittausdataa, kuvia, videota tai simulaatiota. Datan analysointi tapahtuu DigabiOS-pakettiin kuuluvilla ohjelmilla, kuten LibreOffice Calc, LoggerPro, Geogebra ja laskinohjelmat. Kokelaan pitää hallita ohjelmien sujuva käyttö, ja sitä on harjoiteltava lukion alusta

asti mieluiten todellisella mittausdatalla. Viimeistään nyt on myös hankittava kouluun tietokonepohjainen mittausjärjestelmä, ja otettava se aktiivikäyttöön.

Sähköinen koe siis mahdollistaa aivan uudentyyppiset tehtävät, ja kokeellisuuden osaamisen testaamiseen avautuu vihdoin mahdollisuuksia. On visioitu, että tehtävänä voisi olla jopa videolta esitetyn koejärjestelyn analysointi ja parannusehdotusten esittäminen (K. Vähähyyppä, radiohaastattelu YLE:llä 6.6.2016). Tämä edellyttää jo laajaa kokemusta ja koevälineiden tuntemusta. Kokelaita onkin ”altistettava” kokeellisuudelle runsaasti ja monipuolisesti.

5. LUKION FYSIIKAN KURSSIEN KESKEINEN KOKEELLISUUS

Seuraavassa esitellään kurssikohtaisesti eräitä keskeisiä lukiofysiikan kokeita. Lähes kaikki kokeet ovat merkityksiä luovia. Uudet käsitteet rakentuvat aina olemassa olevien pohjalle, kuitenkin koulutodellisuus ja käsitteiden prosessiluonne huomioiden. Esimerkiksi, oppilailla on yläkoulussa saatu käsitys voimasta ilmiönä ja ominaisuutena, ja he osaavat mitata voimia jousivaa’alla ja voima-anturilla. Näin ollen voimaa voidaan käyttää muun muassa mekaanisen työn määrittelyssä kurssissa FY2, vaikka voimasuureen määrittelylaki kvantifioidaan vasta kurssissa FY4.

Esityksessäni LUMA-päivillä 2016 suoritin näistä kokeista suurimman osan; valitettavasti näin artikkelin puitteissa on mahdoton antaa yhtä yksityiskohtaista kuvaa kunkin kokeen toteutuksesta. Laajempia kuvauksia useimmista kokeista on löydettävissä Opettajien laboratorioskursien luentomateriaalista (Hämäläinen 2016). Jos jokin seikka tietyn kokeen toteutuksessa tai merkityksessä jää askarruttamaan, annan mielelläni lisätietoja.

5.1 Fysiikka luonnontieteenä (FY1)

Kurssin selkeitä aihealueita ovat liikeilmiöt ja perusvuorovaikutukset.

Liikeilmiöissä tärkeässä asemassa ovat kinesteettiset kokeet, joissa opitaan kinematiikkaa ja dynamiikkaa oman liikkumisen ja tuntemuksien kautta.

- Liikkeen ja sen kuvaajien yhteys oman liikkeen kuvaajien kautta: Kävellään edestakaisin tietokoneeseen kytketyn etäisyysanturin edessä, kone piirtää reaaliajassa paikan tai nopeuden kuvaajaa. Opitaan, miltä kummallakin kuvaajalla näyttää kun ollaan paikallaan, liikutaan eteen ja taakse, mikä ero on tasaisella ja kiihtyvällä liikkeellä. Pyritään omalla liikkumisella tuottamaan ruudulla näkyvä mallikuvaaja.
- Kinestetikkavaunut: vuorovaikutus, hitaus, liikkeen jatkuvuus ja muutos. Kinestetikkavaunujen sijasta voi käyttää rullalautoja tai herkkäliikkeisiä toimistotuoleja. Vuorovaikutuksen perushahmo: kun kummassakin vaunussa on matkustaja, on sama kumpi työntää; vaikutus kohdistuu molempiin. Hitaus: sama vuorovaikutus muuttaa raskaan vaunun liikettä vähemmän kuin kevyen. Vain vuorovaikutus muuttaa liikettä.



Kuva 1. Kinestetiikkavaunut.

Toinen tärkeä FY1-kurssin osa-alue on tutkimuksen tekeminen. Tähän sisältyvät tutkimuksen suunnittelu, systemaattinen suorittaminen, tulosten käsittely ja esittäminen.

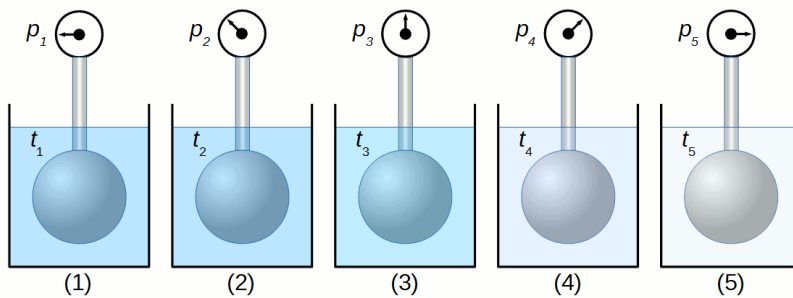
- Systemaattinen kvalitatiivinen tutkimus sähköisestä vuorovaikutuksesta: Havaitaan varauksen lajit ja vuorovaikutuksen suuntasäännöt empiirisesti: Otetaan yksi varautumisilmiö (esimerkiksi turkiksella hangattu muoviputki) verrokiksi. Todetaan että jotkin varautuneet kappaleet vetävät verrokia puoleensa. Ne ovat ilmeisesti jollain tavalla samanlaisia, nimetään ne kategoriaan A. Vastaavasti jotkin varatut kappaleet hylkivät verrokia, nimetään ne kategoriaan B. Havaitaan että kaikki kategorian A kappaleet hylkivät toisiaan, samoin kaikki kategorian B kappaleet. Mikä tahansa kappale kategoriasta A vetää mitä tahansa kappaletta kategoriasta B. Ei löydy sellaista kappaletta, joka vetäisi (tai hylkisi) sekä kategorian A että B kappaletta. Näistä havainnoista tehdään johtopäätös, että samalla tavalla varautuneet kappaleet hylkivät, eri tavalla varautuneet vetävät toisiaan, ja varauksia on tasan kahta lajia.

Vastaava tutkimus voidaan tehdä magneettisesta vuorovaikutuksesta.

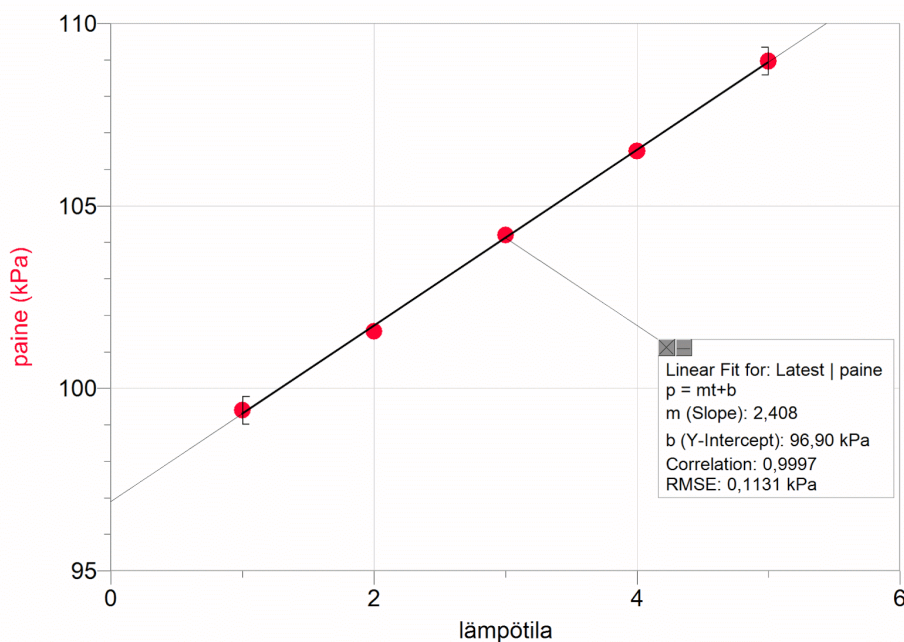
- Kvantitatiivinen tutkimus, josta voi laatia kuvaajan ja sen pohjalta testattavia ennusteita, esimerkiksi:
 - Paperin vetolujuus: miten paperinauhan katkaisemiseen tarvittava voima riippuu nauhan leveydestä?
 - Pallon kantaman riippuvuus lähtökulmasta: Heittoliikkeen teoriaa ei tarkastella FY1:llä, joten tuloksena saadaan puhtaasti empiirinen laki.
 - Paperikartion rajanopeuden riippuvuus halkaisijasta

5.2. Lämpö (FY2)

- Tilamuuttujien (paine, lämpötila, tilavuus) riippuvuus toisistaan kvalitatiivisesti: Ei ole mahdollista muuttaa yhtä tilamuuttujaa ilman ainakin toinen muista muuttuu.
- Boylen laki. Lääkeruisku ja paineanturi, helppo ja nopea toteuttaa tietokonemittauksena. Lämpötilan vakiona pysymisestä ei tarvitse erityisesti huolehtia, kunhan välttää lämmittämästä ruiskua kädellä.
- Suljetussa astiassa olevan kaasun paine lämpötilan funktiona: Kokeella voi olla valitusta käsittehierarkiasta riippuen eri merkityksiä:
 - o Lämpötilan kvantifiointi: osoitetaan että paineen muutos on verrannollinen lämpötilan muutokseen, joten lämpötilan määritelmä voidaan perustaa paineen mittaamiseen ja valittuihin peruspisteisiin. Lämpötilan hallittu varioiminen tehdään sekoittamalla yhtä suuret määrät erilämpöisiä vesiä, oletetaan että seoksen lämpötila on alkulämpötilojen keskiarvo.



Kuva 2. Lämpötilan kvantifiointi

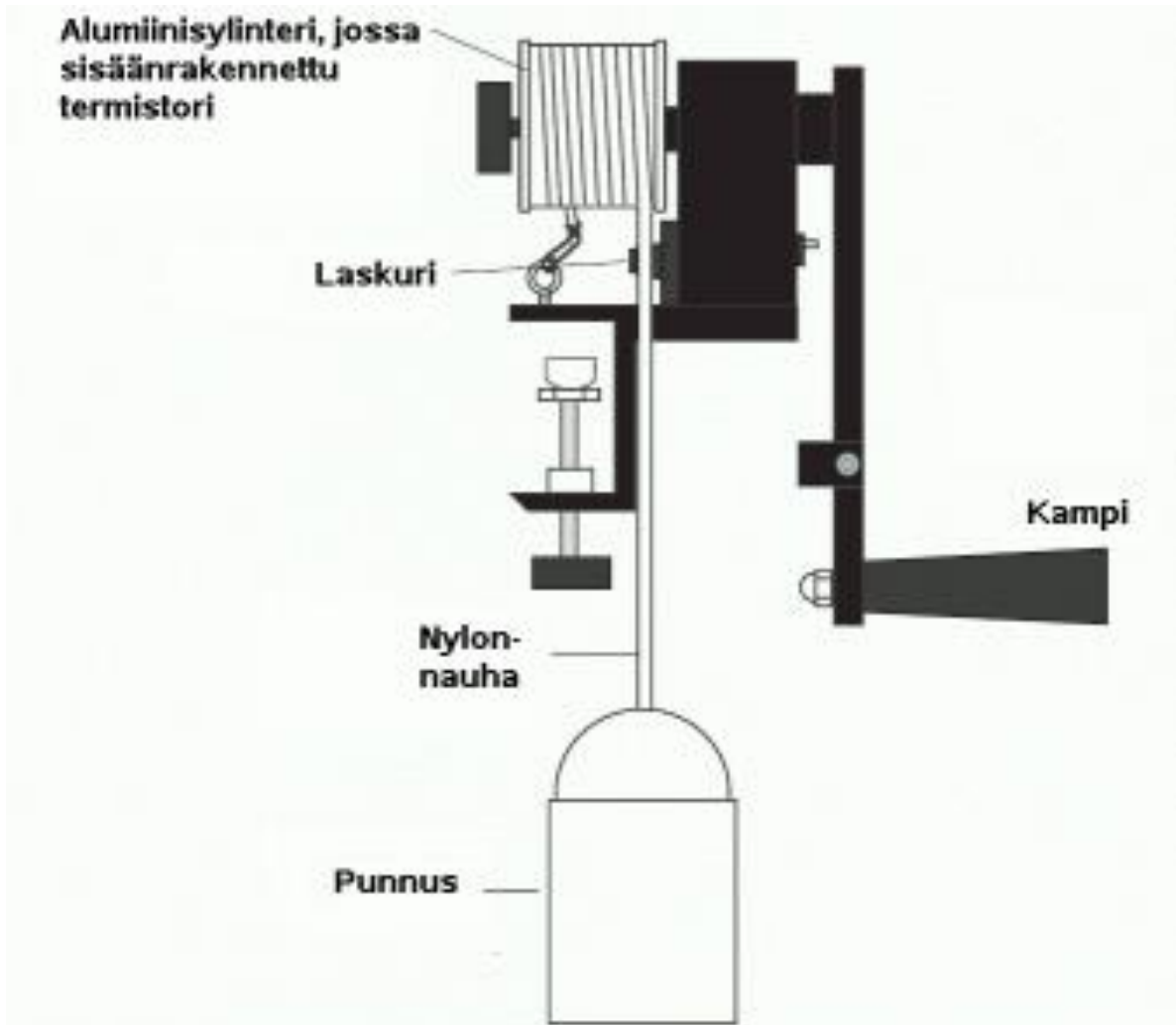


Kuva 3. Paineen muutos on verrannollinen lämpötilan muutokseen.

- Kaasulämpömittari: lämpötila suurena on käytettävissä, osoitetaan että lämpötilaa voi mitata kaasun paineen avulla.
- Charlesin laki: osoitetaan että vakioilavuudessa $\Delta p \propto \Delta t$. Ekstrapoloidaan riippuvuussuora pisteeseen $p = 0$, saadaan arvio matalimmalle mahdolliselle lämpötilalle ja empiirinen perusta absoluuttiselle lämpötila-asteikolle.
- Lämpö energiana: energian perushahmot
 - Lämmön säilyminen ja siirtyminen
 - Lämmön syntyminen tilanteessa jossa liikettä, pariston varausta tms. häviää
 - Lämmön häviäminen tilanteessa jossa liikettä tms. syntyy. On jossain määrin vaikea toteuttaa yksinkertaisilla välineillä, koska pitää mitata esimerkiksi ilman lämpötilaa sylinterissä, jossa laajeneva kaasu työntää männän liikkeelle.
 - Siirtyvä lämpöenergia.
 - Sekoitetaan yhtä suuret määrät erilämpöisiä vesiä, sekoituksen lämpötila on alkulämpötilojen keskiarvo. Säilymisen ja siirtymisen perushahmojen kannalta tulkittuna tämä tarkoittaa, että siirtyvä lämpöenergia on verrannollinen lämpötilan muutokseen, $Q \propto \Delta t$.
 - Sekoitetaan eri suuret massat eri lämpöisiä vesiä, havaitaan $\frac{m_1}{m_2} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}$. Tämä tarkoittaa että siirtyvä lämpöenergia on verrannollinen paitsi lämpötilan muutokseen myös massaan, $Q \propto m\Delta t$.
 - Upotetaan kuuma metallipunnus samamassaiseen kylmään vesimäärään. Havaitaan että loppulämpötila on paljon lähempänä veden kuin metallin alkulämpötilaa. Siirtyvä lämpöenergia riippuu siis myös materiaalikohtaisesta suureesta eli ominaislämpökapasiteetista, $Q \propto c$.

Yhdistetään tulokset siirtyvän lämpöenergian määrittelylaiksi: $Q = cm\Delta t$. Lämpöenergian yksikkö on aluksi määriteltävä standardiaineen avulla, ja historiallisesti tämä aine on ollut vesi. Lämpöenergian yksiköksi tulee siis kalori. Ei pidä säikähtää tätä poikkeamaa SI-järjestelmästä, koska heti seuraavassa kokeessa saadaan joulet käyttöön. Ja onhan kalori joka tapauksessa oppilaille tuttu ravinnon energiasisällön yksikkönä.

- Joulen koe ja mekaaninen työ: Tuotetaan kitkalämpöä metallisylinteriin. Havaitaan että syntyvän lämpöenergian määrä on verrannollinen sekä kitkavoimaan että voiman vaikutusmatkaan. Syy ja seuraus oletetaan yhtä suuriksi, joten määritellään lämpöenergiaa tuottavaksi mekaaniseksi työksi tulo $W = Fs$. Työn yksiköksi saadaan $[W] = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ joule}$. Samalla lämpöenergian yksiköksi saadaan myös joule.

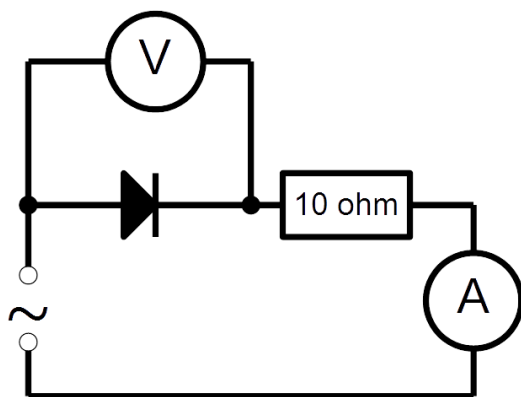


Kuva 4. Joulen kokeen laitteisto

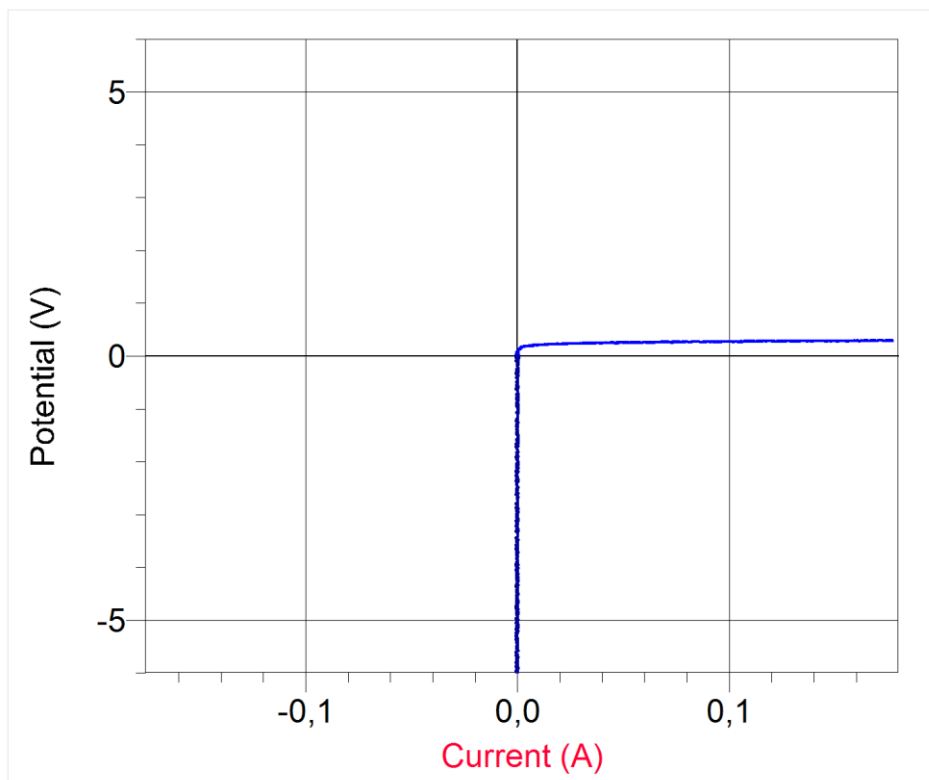
5.3. Sähkö (FY3)

- Sähkövirtailmiö ja sen ominaisuudet: lämpö, valo, magneettinen ja kemiallinen vaikutus: Sähkövirralla on suunta, sähkövirta jakautuu ja yhdistyy, mutta ei kulu.
- Jänniteilmiö ja sen ominaisuudet: jänniteilmiö on sähkövirran syntymisen edellytys, jännitteellä on suunta joka määrää sähkövirran suunnan, jännitteiden summautuminen.
- Mittareiden toiminnan perustelu:
 - o Rinnan kytkettyjen lampujen muodostamassa virtapiirissä jokaisen lampun läpi kulkee selvästi yhtä suuri virta. Käämin läpi johdetaan vuorotellen 1, 2 jne lampun virta ja havaitaan, että magneettinen voima on verrannollinen sähkövirran voimakkuuteen. Magneettista voimaa tai momenttia voidaan siis käyttää sähkövirran voimakkuuden mittaamiseen.

- Jännitemittarin toimintaperiaatetta ei pysty vielä perustelemaan. Mutta voidaan osoittaa, että mittarin mittaama jännite toteuttaa edellä havaitut jännitteen perusominaisuudet: suunta, summautuminen.
- Todetaan mittareilla kvantitatiivisesti Kirchhoffin virtalaki ja jännitelaki.
- Ohmin laki, resistanssi. Hehkulampun $U(I)$. Hehkulampulla ei ole vakioresistanssia, vaan sähkövirrasta riippuva resistanssi $R_s = \frac{U(I)}{I}$. Rinnan ja sarjaan kytkettyjen vastusten resistanssin laskukaavat eivät päde hehkulampuille!
- Diodi ja led mainitaan erikseen OPS:ssa. Kokeellisuuden kannalta oleellisia ovat $U(I)$ -käyrät ja komponenttien käyttö erilaisissa kytkennöissä.



Kuva 5. Kytkentä diodin toiminnan tutkimiseen



Kuva 6. Diodin napajännite virran funktiona

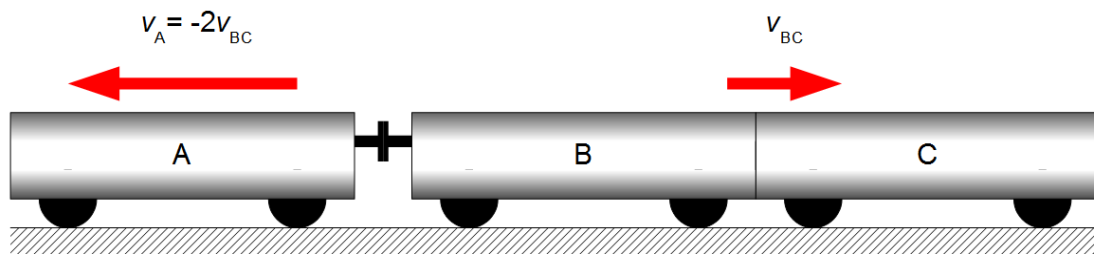
- Sähköteho. Kvalitatiivisesti: kun virtapiiriin lisätään lampuja niin että palavat yhtä kirkkaasti, sähköteho on verrannollinen lampujen määrään. Rinnankytkentä \rightarrow sähköteho on verrannollinen sähkövirran voimakkuuteen, sarjaan kytkentä \rightarrow sähköteho on verrannollinen jännitteeseen. Saadaan ennuste: $P \propto UI$. Lämmitetään vettä uppokuumentimella, mitataan U , I ja lämpötilan nousun avulla veden lämpenemisteho. Havaitaan että mittaustarkkuudella $P = UI$ ja saadaan samalla selitys, miksi voltti on sen suuruinen kuin se on.
- Sähkövirta on varauksen liikettä. Havaitaan varauksen siirtyvän elektroskoopista toiseen vain sellaisten materiaalien läpi, jotka johtavat sähkövirtaa.
- Kvalitatiivinen Coulombin laki: Sähköisen suoravaikutuksen voimakkuuden riippuvuus varauksesta ja etäisyydestä: Koe onnistuu parhaiten nauhageneraattorilla.
- Tasavirtapiireistä tuttu jännite on sama kuin sähköisten tasojen eli potentiaalien ero. Kappaleet ovat eri potentiaalissa, kun kappaleet yhdistettäessä niiden välillä siirtyy varausta. Tällöin potentiaalit asettuvat samoiksi. Kokeessa mitataan levykondensaattorin jännitettä elektrometrillä, eli jännitemittarilla jolla on ääretön resistanssi. Varataan kondensaattori ensin sähköstaattisesti viemällä toiseen levyyn varausta, sitten paristolla. Kummassakin tapauksessa mittari näyttää jännitettä, joka häviää kun kondensaattorin levyt yhdistetään johtimella.
- Sähkökentän kvantitatiivinen tutkimus onnistuu erityisellä heikosti sähköä johtavalla paperilla ("Equipotential and field mapper," 1990). Paperiin voidaan piirtää hyvin sähköä johtavalla hopeapitoisella musteella erimuotoisia elektrodeja, esimerkiksi kaksi yhdensuuntaista viivaa mallintamaan levykondensaattoria. Kun elektrodeihin kytketään jännite, paperiin syntyy sähkökenttä, ja heikko sähkövirta kulkee elektrodien välillä. Jännitemittarilla voidaan nyt mitata paperilta jännitteitä ja potentiaaleja ja tutkia näin ekvipotentiaaliviivojen ja kenttäviivojen kulkua sekä sähkökentän voimakkuutta. Jännitemittarin resistanssin pitää olla luokkaa 10 M Ω , tavallinen digitaalinen yleismittari kelpaa mutta passiivinen kiertokäämimittari ei.

5.4. Voima ja liike (FY4)

- Kaikki vuorovaikutukset vaikuttavat aina molempiin osapuoliin yhtä voimakkaasti. Tämä on niin perustavaa laatua oleva seikka, ja toisaalta oppimistesteissä niin usein havaittu väärin ymmärretyksi, että asian oppiminen täytyy varmistaa kokeella, esimerkiksi törmäyttämällä erimassaisia vaunuja ja havainnoimalla / mittaamalla kumpaankin kohdistuvaa voimaa. Koe onnistuu langattomilla voima-antureilla, tai käyttämällä vaunuissa samanlaisia joustavia puskureita, videoimalla niiden muodonmuutosta ja tutkimalla videota ruutu kerrallaan.
- Liikkeen muutos johtuu aina vuorovaikutuksesta, ja muutos tapahtuu kokonaisvuorovaikutuksen suuntaan. Tarkastellaan erilaisia tilanteita, joissa kappaleen liike selvästi muuttuu, mutta liikettä muuttava vuorovaikutus ei ole aivan ilmeinen. Kuitenkin

kyseinen vuorovaikutus aina löytyy. Esimerkiksi: lentävien kappaleiden, kuten lintujen ja lentokoneiden, liikettä voi muuttaa ainoastaan ilmanvastus ja gravitaatio. Kaltevalla tasolla vierivän pallon liikettä taas ei voi muuttaa pelkkä gravitaatio, koska liike muuttuu myös sivusuunnassa.

- Massa on tietysti oppilaille tuttu käsite kappaleiden punnitsemisen kautta. Hidas massa ja yleisesti massan kaksoisrooli lienee oudompi asia. Tästä syystä olisi hyvä esittää miten hidas massa suurena voidaan määritellä ja mitata käytettävissä olevien suureiden avulla. Käytetään kahta herkkäliikkeistä vaunua, joiden massojen suhde on intuitiivisesti selvä. Kun vaunut laukaistaan jousella erilleen, havaitaan että niiden saamien nopeuksien suhteen vastaluku on kääntäen sama kuin massojen suhde: $\frac{m_A}{m_B} = -\frac{v_B}{v_A}$. Tästä seuraa, että tuntemattoman vaunun massa m voitaisiin mitata käyttäen yksikkönä tietyn standardivaunun massaa m_0 : $m = -\frac{v_0}{v} m_0$.



Kuva 7. Vaunut

- Vaunujen laukaisukoe antaa myös perusteen liikemäärän määrittelylle. Koska $m_A v_A = -m_B v_B$, niin massan ja nopeuden tulo edustaa ilmeisesti jotain joka muuttuu kummallakin vaunulla yhtä paljon mutta vastakkaisiin suuntiin. Toisaalta aikaisemmin on todettu että vuorovaikutuksen voimakkuus on kummankin vaunun kannalta yhtä suuri ja vastakkaissuuntainen. Kun tähän lisätään yleinen periaate että syy (vuorovaikutus) ja seuraus (liikkeen muutos) ovat yhtä suuria, voidaan päätellä että paikaltaan lähtevälle vaunulle tulo mv ja yleisessä tapauksessa $m\Delta v$ kuvaa vaunun liikkeen muutoksen suuruutta. Annetaan tulolle nimi liikemäärä ja tunnus p , jolloin saadaan ennuste $\Delta p_A = -\Delta p_B$. Testataan tätä kokeellisesti.
- Voiman määrittely, N II. Tähän asti voimien mittaaminen jousivaaioilla ja voima-antureilla on ollut ad hoc -tyyppistä: mittaukset näyttävät toimivan oikein, ilman perustelua miksi niin tapahtuu. Voima suurena on kuitenkin tarpeen määritellä käytettävissä olevien suureiden avulla. Todetaan että saman suuruinen liikemäärän muutos on mahdollista saada aikaan erisuuruilla voimilla. Mitä pienempi voima, sitä pidempi täytyy olla voiman vaikutusaika. Toisaalta jos voima pidetään vakiona ja pidennetään vaikutusaikaa niin liikemäärän muutos kasvaa; samoin käy jos pidetään aika vakiona ja kasvatetaan voimaa. Eli liikemäärän muutos saattaisi olla yhtä suuri kuin voiman F ja vaikutusajan tulo. Tästä seuraisi voiman määrittelylaki $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$. Testataan ideaa niin, että kappaleen liikettä muuttaa vuorovaikutus jonka voima on vakio, ja määritetään suhde $\frac{\Delta p}{\Delta t}$. Vaihtoehtoisia koejärjestelyjä:

- Vedetään vaakasuoralla radalla vaunua punnuksella ja langalla, punnuksen paino on vakio.
 - Hyvä: erittäin tasainen vuorovaikutus, helppo mitata ja hyvät tulokset
 - Huonoa: vaikea hahmottaa, että kiihdytettävä kappale on vaunu + punnus, ei-jäykkä kappale, joten pitäisi oikeastaan seurata massakeskipisteen liikettä mutta jos niin tehdään tilanne muuttuu kovin monimutkaiseksi.
- Potkurivaunu, potkurin ja ilman välinen vuorovaikutus kiihdyttää vaunua.
 - Hyvä: selkeä kappale, sangen tasainen vuorovaikutus, kohtuullisen hyvät tulokset.
 - Huonoa: vuorovaikutuksen vakioisuus vaikea todeta, potkuri häiritsee helposti etäisyysanturia.
- Kitka jarruttaa pyörillä kulkevaa vaunua.
 - Hyvä: jäykkä kappale, kitkavuorovaikutuksen vakioisuus todettavissa käsin.
 - Huonoa: jarrutus on vaikeammin ymmärrettävä tilanne kuin kiihdytys, kitka saattaa vaihdella radan eri kohdissa. Kitka pitää toteuttaa erityisellä ”jarrukengällä” niin, ettei se muutu kun vaunun massaa muutetaan.

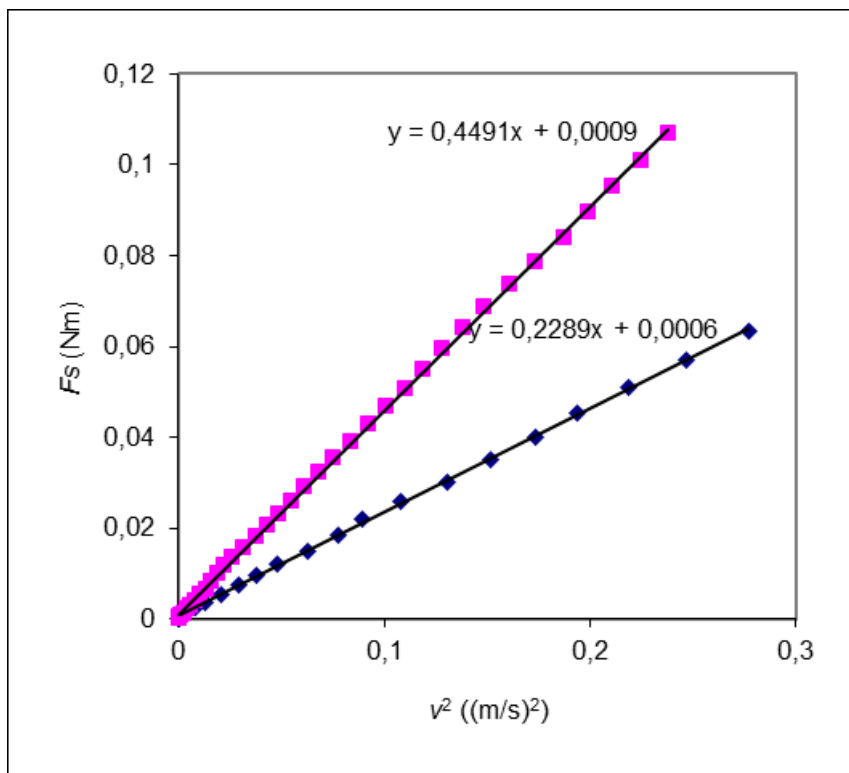
Toteutustavasta riippumatta todetaan että:

- Kun vuorovaikutus on vakio (sama punnus, sama potkurin kierrosluku, sama kitkajarrun säätö), $\frac{\Delta p}{\Delta t}$ pysyy vakiona kappaleen massasta riippumatta.
- Kun vuorovaikutusta varioidaan, $\frac{\Delta p}{\Delta t}$ muuttuu.

Voidaan siis määritellä suure voima yhtä suureksi kuin liikemäärän muuttumisnopeus: $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$. On huomattava että Newton itse formuloi toisen lakinsa juuri tällä tavalla. Toki lausekkeesta voidaan heti johtaa NII:n tutumpi muoto, $F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = m \frac{\Delta v}{\Delta t} = ma$.

- Putoamisliike. Mitataan esimerkiksi ultraäänianturilla erikokoisten pallojen putoamiskiihtyvyyksiä, kun ne putoavat ja pomppaavat lattiasta. Kokeella on useita merkityksiä:
 - Erimassaisilla kappaleilla on intuition vastaisesti sama putoamiskiihtyvyys.
 - Pallolla on sama kiihtyvyys aina kun se on ilmassa, ts. ei ole väliä onko pallo menossa ylös- vai alaspäin. Tämäkin on sangen intuition vastaista, mikäli oppilaalla on jäsentymätön kuva liikesuureiden keskinäisistä riippuvuuksista.

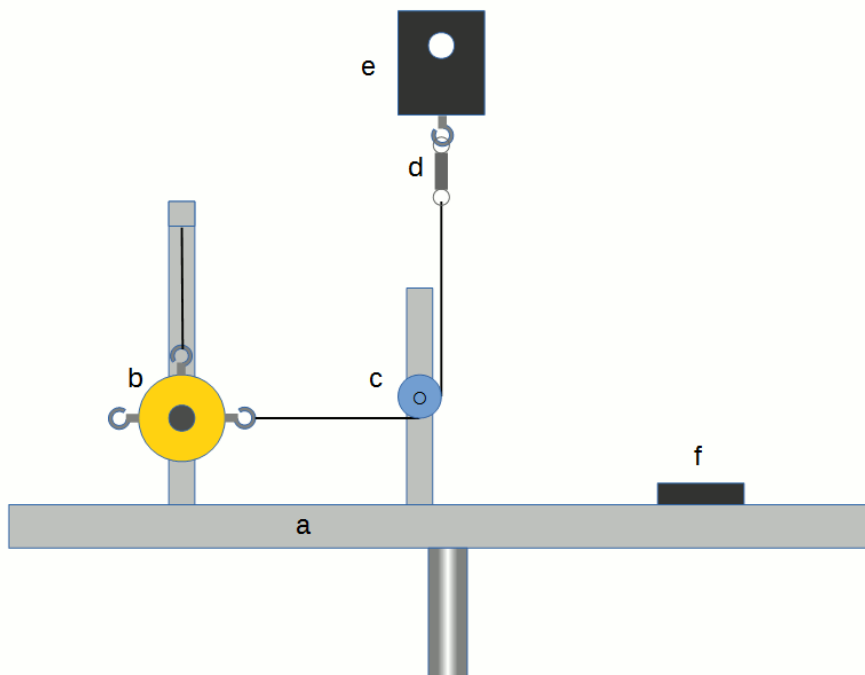
- käyttää punnuksia tunnettujen voimien tuottamiseen.
 - Putoamiskiihtyvyyden riippumattomuudesta massasta on tehtävissä perustavaa laatua oleva päätelmä: hidas massa ja painava massa ovat ekvivalentteja. Jos nimittäin kappaleen hidas massa kaksinkertaistetaan, myös painavan massan pitää kaksinkertaistua että kiihtyvyys pysyy samana.
- Liike-energia ja työperiaate: Liike-energian lauseke tyypillisesti annetaan oppikirjoissa valmiina ilman perusteluja. Kuitenkin laki voidaan johtaa kokeellisesti, mikäli käytettävissä on Joulen kokeesta saatu työn lauseke $W = Fs$. Käytetään kitkajarrulla varustettua vaunua, annetaan kitkan jarruttaa vaunu pysähdyksiin. Lasketaan jarrutusmatkat eri nopeuksista. Kitkavoimasta ja jarrutusmatkasta saadaan kitkan tekemä (negatiivinen) työ, joka on yhtä suuri kuin jarrutuksessa syntyvä lämpöenergia. Energian perushahmo on säilyminen, joten vaunun liikkeen energiaa häviää yhtä paljon kuin lämpöenergiaa syntyy, eli yhtä paljon kuin kitka tekee työtä. Piirretään kuvaaja (v^2, Fs) jossa F on kitkavoima, s jarrutusmatka ja v alkunopeus. Havaitaan että pisteet asettuvat suoralle, jonka kulmakerroin on noin 0,5 m. Näin ollen liike-energia $E_k = W = \frac{1}{2}mv^2$.



Kuva 8. Kitkavoiman tekemä työ jarrutuksessa alkunopeuden neliön funktiona

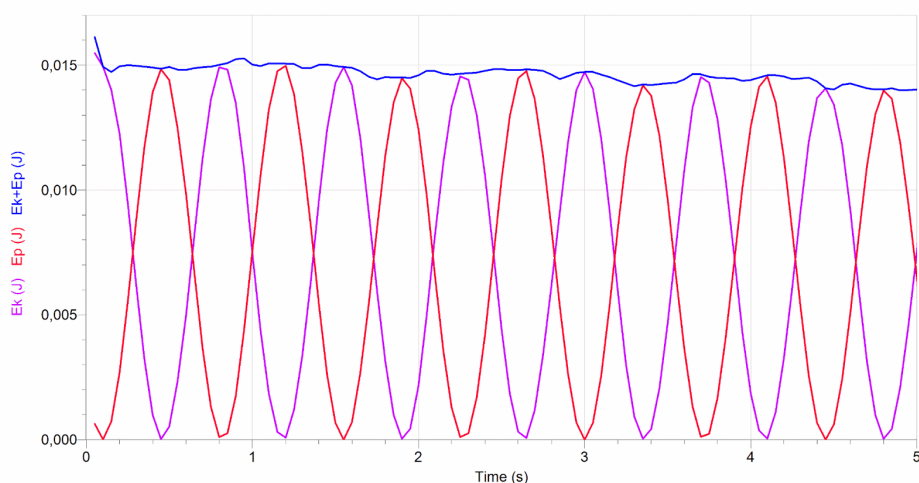
5.5. Jaksollinen liike ja aallot (FY5)

- Normaalikiihtyvyys ja normaalivoima: Normaalivoiman riippuvuutta kulmanopeudesta ja kappaleen massasta voidaan tutkia esimerkiksi kuvan X mukaisella järjestelyllä.



Kuva 9. Laitteisto normaalikiiktyvyyden lakien kvantifointiin: a) pyörityslaite, b) heiluriksi ripustettu punnus, c) väkipyörä, d) leikari, e) voima-anturi, f) tasapainotuspunnus

- Harmoninen liike: liikesuureet ja voima, taajuus, amplitudi; energia. Ilmatyynyradan vaunu kytetään jousella voima-anturiin, mitataan liikesuureita ja voimaa. (Tarkkaan ottaen pitäisi mitata vaunuun kohdistuvaa voimaa, mutta se on teknisesti hankalampaa koska voima-anturin pitää olla vaunun kyydissä.) Havaitaan liikesuureiden ja voiman kuvaajien sinimuotoisuus, systeemi noudattaa dynamiikan peruslakia ja jousivoiman lakia. Tietokone laskee reaaliajassa liike-energian ja jousivoiman potentiaalienergian, todetaan miten ne muuttuvat ajan funktiona mutta summa pysyy vakiona.



Kuva 9. Värähtelijän liike-energia, potentiaalienergia ja niiden summa

- Aaltokone: aaltoliikkeen synty ja eteneminen: Aaltokone koostuu keskeltä toisiinsa jousilangalla kytketyistä sauvoista. Laite muodostaa tärkeän sillan värähdysliikkeestä

aaltoliikkeeseen, koska aaltokoneessa erottuvat selkeästi yksittäiset systeemille hitauden antavat osat, osia tasapainoon palauttava vuorovaikutus (langan kiertokimmoisuus) sekä liikkeen osasta toiseen välittävä vuorovaikutus (myös kiertokimmoisuus). Nämä aaltoliikettä välittävän systeemin elementit pitäisi jatkossa tunnistaa kaikille tarkasteltaville aaltoliikkeille.

- Aaltoammekokeet: taittuminen, diffraktio, Dopplerin ilmiö. Aaltoamme on erittäin tärkeä opetusväline, koska sillä voidaan konkreettisesti ja makroskooppisessa mittakaavassa saada näkyviin aaltoliikkeen perusilmiöitä. Taittuminen saadaan aikaan vettä madaltavalla muovikolmiolla. Aallot kulkevat matalassa vedessä havaittavasti hitaammin, ja aaltorintamien suunta kääntyy rajapinnassa. Diffraktioilmiöt tehdään kahdella pistelähteellä, jolloin havaitaan ympyräaaltojen interferenssi sekä taajuuden ja lähteiden etäisyyden vaikutus diffraktiokuvioon.
- Äänen aaltomuoto, taajuus, spektri. Tässä tietokonepohjainen mittaus on aivan välttämätön. Paljon mahdollisuuksia integrointiin musiikin kanssa.
- Äänen nopeus. Onnistuu sananmukaisesti sormia napsauttamalla, rekisteröimällä äänen edestakaista heijastumista muoviputkessa, tulos on tarkka. Voidaan tehdä myös ilmaa raskaammalla kaasulla kuten tetrafluorietaanilla, jolloin havaitaan äänen nopeuden olevan pienempi kuin ilmassa.
- Äänen voimakkuus. Osoitetaan mikä yhteys on äänen intensiteetin (ääniteho/pinta-ala), kuulohavainnon ja dB-mittarilla mitatun äänenvoimakkuuden välillä. Kytetään kaiutin signaaligeneraattoriin sekä vaihtovirta- ja vaihtojännitemittariin. Näin pystytään mittaamaan kaiuttimeen menevää sähkötehoa, ja siten hallitusti varioimaan äänen intensiteettiä. Havainnot:
 - o Äänen intensiteetin kaksinkertaistaminen aistitaan lähtötasosta riippumatta aina yhtä suurena voimakkuuden lisäyksenä.
 - o Desibelimittarin avulla osoitetaan, että intensiteetin kaksinkertaistaminen vastaa aina noin 3 dB ja kymmenkertaistaminen noin 10 dB voimakkuuden lisäystä.

5.6. Sähkömagnetismi (FY6)

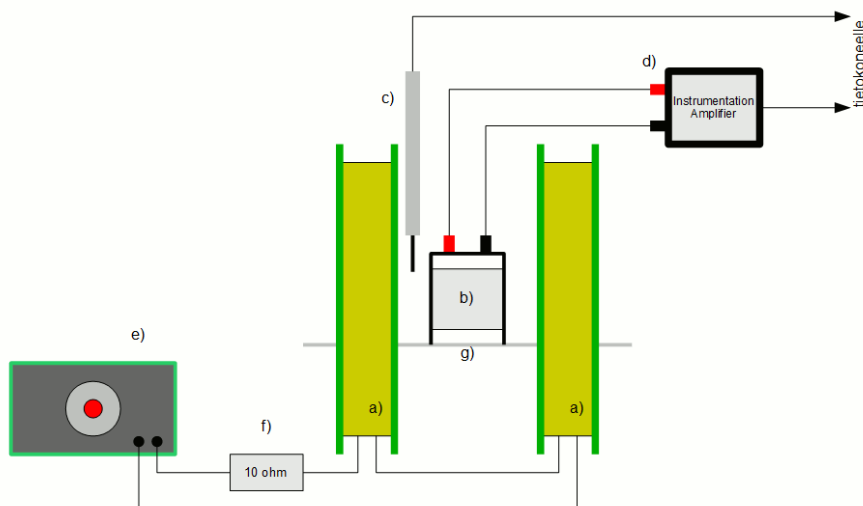
Magneetit ja magneettikenttä:

- Magneettivuon tiheys olisi mahdollista kvantifioida, mutta se edellyttäisi magneettimomentin käsitettä joka ei kuulu normaaliin lukiokurssiin. Siksi on tyytyminen mittarikvantifointiin, ts. osoitetaan että magneettivuon tiheysmittari tai anturi ilmeisesti mittaa magneettikentän voimakkuutta. Viedään magneetti lähemmäs ja kauemmas anturista, laitetaan anturi käänin sisään ja varioidaan virtaa.

- Induktion kvalitatiivinen tutkiminen: Havaitaan käämiin indusoituvaa jännitettä, kun käämin läpäisevää magneettikenttää varioidaan eri tavoin: liikuttamalla kestmagneettia lähemmäs ja kauemmas, kääntelemällä käämiä ja magneettia, varioimalla lähelle sijoitetun käämin virtaa. Havaitaan että induktiojännite syntyy silloin ja vain silloin kun käämin läpäisevä magneettikenttä muuttuu. Jännite riippuu muuttumisnopeudesta: mitä nopeampi muutos, sitä suurempi jännite.

YO-kokeessa on lähes poikkeuksetta ollut induktioon liittyvä tehtävä, ja vastauksissa näkyy toistuvasti sama ongelma ilmiön ymmärtämisessä: kuvitellaan että indusoituva jännite on verrannollinen magneettivuohon, eikä magneettivuon muutosnopeuteen. Tämän virhekäsityksen karsimiseen (ja syntymisen välttämiseen) on syytä kiinnittää erityistä huomiota.

- Induktion kvantitatiivinen tutkiminen: Kenttäkäämit joihin syötetään vaihtovirtaa kolmiomuotoista vaihtovirtaa. Sisälle asetetaan testikäämi, jonka jännitettä mitataan, samoin magneettivuon tiheyttä testikäämin kohdalla. Varioimalla vuorotellen vaihtovirran taajuutta, käämien akseleiden kulmaa sekä testikäämin pinta-alaa ja kierroslukua, saadaan induktiolaki muodossa $U = -N A c o s \alpha \frac{\Delta B}{\Delta t}$. Muodostetaan uusi suure magneettivuo $\Phi = -A B c o s \alpha$ kuvaamaan käämin läpäisevän magneettikentän määrää, ja tehdään yleistys niin että laki pätee myös ei-tasaiselle vuon muutokselle. Tällöin induktiolaki yhdelle silmukalle voidaan kirjoittaa $U = -\frac{d\Phi}{dt}$.



Kuva 10. Induktiolain tutkimuslaitteisto. a) kenttäkäämit, b) testikäämi, c) mg-vuon tiheys -anturi, d) vahvistin, e) signaaligeneraattori, f) vastus, g) astelevy.

- Vaihtovirran synty. Käämi pyörivässä magneettikentässä. Huom! Käämin pitää olla magneetin pyörimisakselilla, että saadaan sinimuotoinen induktiojännite. Käsigeneraattori on erinomainen laite havainnollistamaan sähköenergian tuotantoa ”näppituntumalla”. Kun

generaattoriin kytketään hehkulamppu, kammien pyörittäminen muuttuu huomattavasti raskaammaksi.

- Valon diffraktio kaksoisraossa ja hilassa: analogia aaltoammeella tehtyjen diffraktiokokeiden kanssa
- Spektrien tutkimus. Spektrianalyysi on tärkeä tutkimusmenetelmä. Jokaisella kaasumaisella alkuaineella on sille ominainen emissiospektri → elektroniverhon energiatilat. Hehkuvalla kiinteällä aineella on jatkuva spektri. → aineessa on lähes äärettömästi energiatiloja

5.7. Aine ja säteily (FY7)

- Valosähköinen ilmiö. Kokeeseen on saatavana hyvin helppokäyttöinen laitteisto, jossa valonlähteenä käytetään ledejä (Photoelectric effect, 2013).
- Radioaktiivinen hajoaminen, puoliintumisaika. U-238 -preparaatti, josta erotetaan kemiallisesti Pa-234m -isotooppia. Preparaatti on täysin suljettu kapseli, jossa on kahta toisiinsa liukenematonta, eri tiheyden omaavaa nestettä. U-238 on tiheämmässä nesteessä liuenneena uraaninitraattina. Uraanin hajoamistuotteena syntyy koko ajan Pa-234m:aa. Nesteet voidaan sekoittaa kapselia ravistelemalla, jolloin protaktinium liukenee keveämpään nesteeseen. Kun ravistaminen lopetetaan, kevyt neste nousee raskaan nesteen pinnalle, ja mittaamalla voidaan tutkia Pa-234m:n hajoamista keveämmässä nesteessä. Pa-234m on beta-aktiivista. Pa-234m:n puoliintumisaika on 70,2 s. Aktiivisuus on matalahko, mikä hieman vaikeuttaa mittauksia. Preparaatin käsittely on helppoa ja turvallista, eikä kokeessa synny jätettä. Preparaatti on myös sangen pitkäikäinen, koska U-238:n puoliintumisaika on noin 4,5 miljardia vuotta.



Kuva 11. U-238 -preparaatti ja tietokoneeseen kytketty geigermittari

6. LOPUKSI

Kuten nähdään, lukiofysiikan kokeellisuuden kenttä on laaja. Kokeellisuuden toteuttaminen opetuksessa edellyttää opettajalta paitsi laajaa teknistä osaamista, myös syvällistä ymmärrystä aihealueen käsiterakenteesta ja siitä miten kokeita käytetään tuon rakenteen pystyttämiseen myös oppilaan mieleen. Kokeellisuuden toteuttamisen tarvitaan myös aivan konkreettisesti sekä perinteisiä että moderneja välineitä, ja jos niitä ei vielä koulussa ole, rahaa välineiden hankkimiseen ja mahdollisesti käyttäjien kouluttamiseen. Taloudellisesti kireänä aikana tällaisista vaatimuksista helposti pyritään tinkimään, varsinkin kun resursoinnista päättävien omat oppimiskokemukset saattavat olla peräisin ajalta, jolloin opetusvälineiksi katsottiin riittävän liitu ja taulu. Tällöin on syytä muistuttaa että nykyisin kokeellinen opetus on OPSin asettama normi, josta ei voi tinkiä. Samaten uudistuva ylioppilastutkinto asettaa osaamisen vaatimukset sellaisiksi, ettei hyviä arvosanoja enää pysty saavuttamaan pelkän teoreettisen opetuksen pohjalta.

7. LÄHTEET

Equipotential and field mapper. (1990). Pasco Scientific. Luettu 29.10.2016 osoitteesta https://www.pasco.com/file_downloads/Downloads_Manuals/Field-Mapper-Kit-Manual-PK-9023.pdf

Hämäläinen, A. (2016). *Opettajien laboriokurssit.* Luettu 29.10.2016 osoitteesta <http://www.courses.physics.helsinki.fi/ope/opelab/>

Kurki-Suonio, K. & Kurki-Suonio, R. (1994). *Fysiikan merkitykset ja rakenteet.* Helsinki: Limes ry

Opetushallitus. (2015). *Lukion opetussuunnitelman perusteet 2015.* Luettu osoitteesta http://www.oph.fi/download/172124_lukion_opetussuunnitelman_perusteet_2015.pdf

Photoelectric effect. (2013). NTL. Luettu 29.10.2016 osoitteesta http://global.ntl.de/media/wysiwyg/ProduktPDFs/DR420-1P_Manual_ENG.pdf