

Demonstraatiot fysikaalisen käsitteenmuodostuksen tukena – esimerkkinä hidas massa¹

Seppo Andersson, Ari Hämäläinen ja Kaarle Kurki-Suonio

Fysiikan laitos
Helsingin yliopisto

Suureiden määrittelyä tarkastellaan osana havaintoon ja mittaukseen perustuvaa käsitteenmuodostusprosessia. Määrittelyssä erotetaan neljä komponenttia: luonnehdinta, kokeellinen määrittely, määrittelylaki ja teoreettinen merkitys. Ne vastaavat suureen käsittelyn peräkkäisiä vaiheita kokeellisen lähestymistavan mukaisessa opetuksessa, jossa käsitteenmuodostus etenee hahmotusprosessina asteittain kohti käsitteistön korkeampia hierarkiatasoja. Ajatuskulkua ja sen nojautumista havaintoihin tarkastellaan yleisesti. Tarkastelu osoittaa fysiikan suurejärjestelmän hierarkkiseksi verkoksi, jossa suureiden teoreettisuusaste vähitellen kasvaa ja joka määrää suureiden käyttöönoton luonnollisen järjestyksen. Esimerkkinä esitellään hitaan massan käsittely, sen tukemiseksi kehitetty koesarja sekä alustavat kokemukset sen käytöstä demonstraationa ja oppilastyönä yliopiston peruskurssilla.

1. Suureiden määrittely fysiikassa

Suureet ovat fysiikan käsitteenmuodostuksen perusta. Luonnonilmiöiden kvantitatiivinen esittäminen perustuu suureisiin. Kokeellinen tieto ilmaistaan niiden avulla. Teoriat käsittelevät niiden välisiä relaatioita. Fysiikan oppimisen kannalta on sen tähden ratkaisevaa, että suureiden merkitys opitaan alusta lähtien kunnolla.

Tapa, jolla suureita otetaan käyttöön tai määritellään opetuksessa, ei ole lainkaan yhdentekevää. Perinteisessä kaavakeskeisessä opetuksessa oppilaalle jää helposti mielikuva, jonka mukaan suureita otetaan käyttöön tunnettujen suureiden lähes mielivaltaisina algebrallisina lausekkeina, jotka vain "osoittautuvat käyttö-

¹ Teoksessa J. Laurén (toim.) Kokeellisempaan fysiikan ja kemian opetukseen. Jyväskylän yliopisto 1988. Kasvatustieteiden tutkimuslaitoksen julkaisusarja B. Teoriaa ja käytäntöä **28**, 43-56

kelpoisiksi". Näin syntyy se varsin usein esitetty harhakuva, että suureet jakautuisivat kahteen luokkaan, kokeellisiin ja teoreettisiin.

Puhtaasti "kokeellisia suureita" olisivat varsinaisesti vain yksikköjärjestelmän perussuureet, joilla on kokeellinen määrittely. Muut olisivat algebrallisesti määriteltyjä "teoreettisia suureita". Oppilaalta jää oivaltamatta se perusseikka, että kaikki fysiikan käsitteet ovat sekä kokeellisia että teoreettisia. Kaikilla suureilla on kokeellinen perustansa. Niiden käyttöönotto perustuu aina tarpeeseen esittää täsmällisesti luonnon olioiden tai ilmiöiden havaittuja tai kokeellisesti osoitettuja ominaisuuksia.

Jokaisen suureen käyttöönottoon ja määrittelyyn kuuluvat seuraavat välttämättömät komponentit:

1. *Luonnehdinta* ilmaisee, mihin systeemeihin ja ilmiöihin suure liittyy ja millaista niiden ominaisuutta se kuvaa.
2. *Kokeellinen määrittely* ilmaisee, miten suure mitataan tai mitä mittauksia sen määrittämiseksi tarvitaan.
3. *Määrittelylaki* on se kokeellisesti todettava laki (invarianssi), joka motivoi uuden suureen käyttöönoton ja ilmaisee täsmällisessä mittaamalla todettavassa muodossa suureen esittämän ominaisuuden.
4. *Teoreettinen merkitys* ilmaisee suureen aseman fysiikan tietorakenteessa.

Suureiden määritelmät ovat aina avoimia. Fysiikan kehittyessä nekin kehittyvät. Suureiden käyttöalue laajenee ja niiden merkitys yleistyy. Jokainen laajennus tai yleistys merkitsee määrittelyn kunkin neljän osa-alueen täydentämistä, ks. myös Kurki-Suonio ym. (1985, 13–17).

Teoreettisessa opetuksessa on mahdollista selvittää tätä ajatuskulkua ja kehitystä, mutta lähestymistapa on aito ja voi saada konkreettisen sisällön vain, jos nojautuminen kokeelliseen perustaan demonstroidaan tai käydään läpi oppilaslaboratoriossa.

2. Suureiden kokeellisen perustan osoittaminen

Suureen määrittelyn neljä komponenttia vastaavat fysiikan käsitteenmuodostuksen neljää hierarkkista tasoa (Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1988). Niiden järjestys ilmaisee suureen käyttöönoton ja käsittelyn luonnollisen kokeellisen lähestymistavan opetuksessa. Käsitteenmuodostusta tukevat demonstraatiot ja laboratoriotyöt liittyvät kolmeen ensimmäiseen vaiheeseen.

Luonnehdinta tapahtuu ilmiöiden eli kvalitatiivisen tiedon hierarkiatasolla. Demonstraatioiden tehtävä tässä vaiheessa on myös kvalitatiivinen, huomion kiinnittäminen ilmiön sellaisiin piirteisiin tai ominaisuuksiin, joiden esittämiseksi suuretta tarvitaan.

Kokeellinen määrittely ja määrittelylaki kytkeytyvät yhteen ilmiön tarkastelun kvantitatiivisella tasolla, jossa myös demonstraation tai oppilastyön on oltava ainakin semikvantitatiivinen. Kokeelliseen työskentelyyn sisältyy tällöin periaatteessa seuraava ajatuskulku (Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1987a, 20):

1. Tutkitaan ilmiötä sellaisessa yksinkertaisessa (ideaali-) tilanteessa, jossa tarkasteltava ominaisuus esiintyy mahdollisimman selvänä ja pelkistettynä.
2. Todetaan kokeellisesti laki, jota ilmiötä kuvaavat tunnetut suureet noudattavat tässä tilanteessa (likimäärin), ja esitetään se *invarianssin* muodossa:

suureiden invariantti yhdelmä (lauseke) = vakio.

Invarianssi (vakioisuus) merkitsee tässä jotakin tiettyä, selvästi todettavissa olevaa riippumattomuutta joistakin parametrisuureista, olosuhteista tai systeemistä.

3. Lain perusteella tämä invariantti yhdistelmä on luonnollista ottaa käyttöön uutena, ilmiölle ominaisena suurena. Laista tulee näin suureen määrittelylaki, joka motivoi suureen käyttöönoton ja antaa sille *määrittelylausekkeen* tunnettujen suureiden johdannaissuurena. Laki voidaan tämän jälkeen ilmaista yksinkertaisessa muodossa:

$$\text{suure} = \text{vakio}.$$

4. Saatua lauseketta voidaan tämä jälkeen käyttää suureen määritelmänä myös yleisemmissä tilanteissa, joissa se ei ole vakio. Näin suureen käyttöalue laajenee, suure irtautuu määrittelylaistaan, ja ilmiön yleisempi kuvaaminen suureen avulla tulee mahdolliseksi. Määrittelylaista tulee ilmiön yksinkertainen algebrallinen malli, joka esittää ilmiötä lain pätevyysalueella.

Ajatuskulkua on helpointa tarkastella ensin tilanteessa, jossa jo joitakin suureita tunnetaan ja uuden suureen määrittely voidaan nojata niihin.

Esimerkiksi *resistanssin* määrittely nojautuu jo tunnettuihin sähkövirtaan ja jännitteeseen. Kun mitataan tasavirtapiirin vastuksessa kulkeva virta I ja sen päiden välinen jännite U , voidaan todeta (likimääräinen) verrannollisuus $U \sim I$. Tämä on Ohmin laki, joka pätee tietynlaisilla komponenteilla ja riittävän pienillä virroilla vakioämpötilassa. Sen perusteella komponentin kykyä vastustaa sähköä kulkua voidaan esittää virrasta riippumattomalla invariantilla U/I . Tämä määrittelee uuden suureen, komponentin resistanssin R . Ohmin laki voidaan sen avulla ilmaista muodossa $R = \text{vakio}$. Lauseketta U/I , tai Ohmin lain pätevyysalueella ekvivalenttia lauseketta dU/dI , voidaan käyttää resistanssin määritelmänä myös komponenteille, jotka eivät noudata Ohmin lakia, ks. (Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1987b).

Toisena esimerkkinä tarkastellaan *nopeutta*. Se on niin tuttu suure, ettei sen käyttöönoton perustana olevaa lakia ole totuttu samalla tavalla hahmottamaan. Ajatuskulku on kuitenkin yksinkertainen, ja havainnollistaa hyvin suureiden määrittelyn periaatteita.

Havaitaan, että tietyissä yksinkertaisissa liikeilmiöissä kappaleen siirtymä on (likimäärin) verrannollinen aikaväliin, $\Delta x \sim \Delta t$. Tämän lain pätiessä, suhde $\Delta x/\Delta t$

on invariantti, aikavälistä Δt riippumaton. Se on siten johdonmukaista ottaa käyttöön uutena liikettä kuvaavana suurena, joka on liikkeen nopeus $v = \Delta x / \Delta t$. Tämä lauseke ja määrittelylain pätevyysalueella ekvivalentti lauseke dx/dt yleistetään sitten tunnetulla tavalla liikettä yleisemmin esittäviksi keskinopeudeksi ja hetkelliseksi nopeudeksi. Malli, jonka tämä laki määrittelee, on tasainen liike.

3. Suurehierarkia ja käyttöönoton järjestys

Noudatettaessa järjestelmällisesti kokeellista lähestymistapaa (Kurki-Suonio, K. & R. 1988) hahmottuu myös vähitellen kuva fysikaalisten *suureiden hierarkiasta*. Uuden suureen käyttöönotto nojautuu tiettyihin aikaisempiin suureisiin ja on mahdollinen vain, jos nämä jo tunnetaan. Kyseessä ei kuitenkaan ole algebrallinen määrittely, vaan tunnettuja suureita mittaamalla todettava kokeellinen laki, josta suureen määrittelylauseke seuraa. Näin muodostuu suureiden ketjuja ja verkkoja, jotka kiinnittävät tietyn etenemissuunnan ja järjestyksen suureita käyttöön otettaessa. Edempänä olevat suureet ovat hierarkiassa korkeammalla, niillä on suurempi teoreettisuusaste ja ne ovat luonteeltaan strukturaalisempia.

Resistanssi on suurehierarkiassa varsin korkealla. Sen käyttöönottoa edeltää pitkä ketju suureita. Nojautuuhan sähkövirran määrittely voimaan ja jännitteen määrittely energiaan, jotka kumpikin ovat hyvin teoreettisia rakenteellisia suureita.

Nopeus on hierarkiassa alhaalla. Sen määrittelyyn tarvitaan vain aikavälin ja etäisyyden käsitteitä, jotka ovat fysiikan aivan ensimmäisiä perussuureita.

Etäisyyden ja aikavälin määrittelyyn fysikaalisina suureina ei, ainakaan alkeisopetuksessa, kiinnitetä paljon huomiota. Sen tähden juuri niistä jää se mielikuva, että ne olisivat ns. kokeellisia suureita. Kuitenkin myös niiden käyttöönotto nojautuu lakeihin. Samalla siihen kätkeytyy syvällinen teoreettinen idea, joka on pohjimmaltaan oletus avaruuden ja ajan homogeenisuudesta ja isotrooppisuudesta.

Etäisyyden ja aikavälin määrittelylait ovat fysiikan perusinvariansseja:

1. Suhdeluku, joka saadaan tulokseksi mitattaessa kappaleen pituutta toisella kappaleella, on invariantti, riippumaton kappaleiden paikasta ja asennosta sekä mitausajasta.
2. Kahden jaksollisen ilmiön (jakson) lukumäärien suhde on invariantti, riippumaton tarkastellusta aikavälistä.

Molemmat koskevat kokeellisesti määritettäviä lukumääriä tai lukumäärien suhteita. "Perussuureet" etäisyys ja aikaväli nojautuvat siten vielä perustavampaan suureeseen, *lukumäärään*, joka ilmeisesti on hierarkian pohjalla lepäävä kaikkien suureiden "kantaisä".

Pituuden ja ajan *yksiköt* voidaan määritellä valitsemalla jotkin, periaatteessa mielivaltaiset kappale ja jaksollinen ilmiö peruskappaleeksi ja perusilmiöksi, joiden pituus ja jaksonaika ovat yksiköt.

Matkan, ajan ja nopeuden käyttöönotto ei ehkä välttämättä vaadi tuekseen perusteellista demonstroitua. *Massa* ja *voima* ovat ensimmäiset suureet, joiden merkitys on oppilaille vieras. Sanat ovat tutut, mutta niiden merkitys on erilainen kuin näiden sanojen yleiskielinen käyttö antaa aiheen ajatella. Siksi ne ovatkin fysiikan opetuksen ikuisia kompastuskiviä. Koko fysiikan käsitejärjestelmä lepää kuitenkin niiden varassa. Voiman käyttöönoton kokeellisesta perustasta on Suomessakin kirjoitettu paljon ja on esitetty demonstraatioita sen tukemiseksi (ks. esim. Seinelä 1987 ja Kurki-Suonio ym. 1982, 80, 84–85).

4. Hitaan massan kokeellinen perusta

Suurenimellä massa on klassisessa fysiikassa kaksi eri merkitystä: *hidas massa* ja *painava massa*. Ne esittävät kappaleen kahta erilaista perusominaisuutta, niiden määrittely perustuu eri lakeihin, joten ne ovat kokeelliselta perustaltaan eri suureita.

Hidas massa kuvaa kappaleen hitautta eli sitä, miten vaikeaa kappaleen liiketilän muuttaminen on. Perushavainto on, että erilaisten kappaleiden vuorovaikutuksessa, esim. törmätessä, niiden nopeudet muuttuvat eri tavoin. Tämä erilaisuus on sitä selvempi, mitä suurempi "kokoero" kappaleilla on. Suuremmilla kappaleilla on suurempi hitaus.

Hitautta esittävän suureen löytämiseksi voidaan tarkastella lähemmin kappaleiden nopeuden muutoksia törmäyksissä. Kokeet voivat noudattaa seuraavaa ajatuskulkua (Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1987b, 97–100):

1. Mitataan törmäävien kappaleiden P ja Q nopeuksien muutokset ja todetaan niiden verrannollisuus $\Delta v_P \sim -\Delta v_Q$. On olennaista, että kokeessa varioidaan paitsi kappaleiden alkunopeuksia, myös niiden vuorovaikutuksen luonnetta (pehmeät ... kovat pinnat, kimmoton ... energiaa vapauttava törmäys, pyörimättömät ... pyörivät kappaleet).

Tuloksen mukaan suhde $|\Delta v_P|/|\Delta v_Q| = k_{PQ}$ on invariantti, riippumaton kappaleiden nopeuksista ja vuorovaikutuksen luonteesta. Se voidaan siten ottaa käyttöön uutena suureena, joka on kappaleparille (P, Q) ominainen positiivinen vakio ja ilmaisee kvantitatiivisesti niiden hitaussuhteen. Jos $k_{PQ} = 1$, kappaleilla on sama hitaus, jos $k_{PQ} > 1$, P:n hitaus on suurempi kuin Q:n. Suureen määritelmästä seuraa, että $k_{QP} = 1/k_{PQ}$.

2. Verrattaessa eri parien kokeellisesti määritettyjä hitaussuhteita k_{PQ} todetaan laki $k_{PQ}/k_{RQ} = k_{PR}$, joka pätee mielivaltaisille kolmelle kappaleelle P, Q ja R.

Tämän lain perusteella kappaleparin hitaussuhde k_{PQ} on mahdollista tulkita kappaleiden hitauksien suhteeksi. Törmäyttämällä kappaleita saman valitun vertailukappaleen O kanssa voidaan määrittää kappalekohtaiset vakiot $k_P = k_{PO}$, $k_Q = k_{QO}$, joiden suhde ilmaisee kappaleiden hitaussuhteen $k_P/k_Q = k_{QO}$. Vakio k_P on kuitenkin sitä pienempi, mitä suurempi kappaleen P hitaus on. Hitautta esittäväksi suureksi sopii sen käänteisarvo $m_P = 1/k_P = 1/k_{PO}$, jolloin hitaussuhteeksi tulee $k_{PQ} = m_Q/m_P$.

Näin saatu suure on kappaleen hidas massa. Vertailukappale O toimii tarkastelussa hitaan massan yksikön määritelmänä. Tarkastelun perusteella voidaan nimittäin kirjoittaa

$$m_P = (1/k_{PO})m_O .$$

Suhde $1/k_{PO} = |\Delta v_O|/|\Delta v_P|$ voidaan käsittää hitaan massan lukuarvoksi ja m_O yksiköksi, joka kantaa tähän suureeseen (mahdollisesti) liitettävää dimensiota.

3. Tarkastelua voidaan täydentää yhdistämällä kappaleet P ja Q ja määrittämällä törmäyskokein näin saadun kappaleen (P+Q) hidas massa $m_{(P+Q)} = 1/k_{(P+Q)O}$. Näin voidaan todeta kokeellisena lakina hitaan massan additiivisuus,

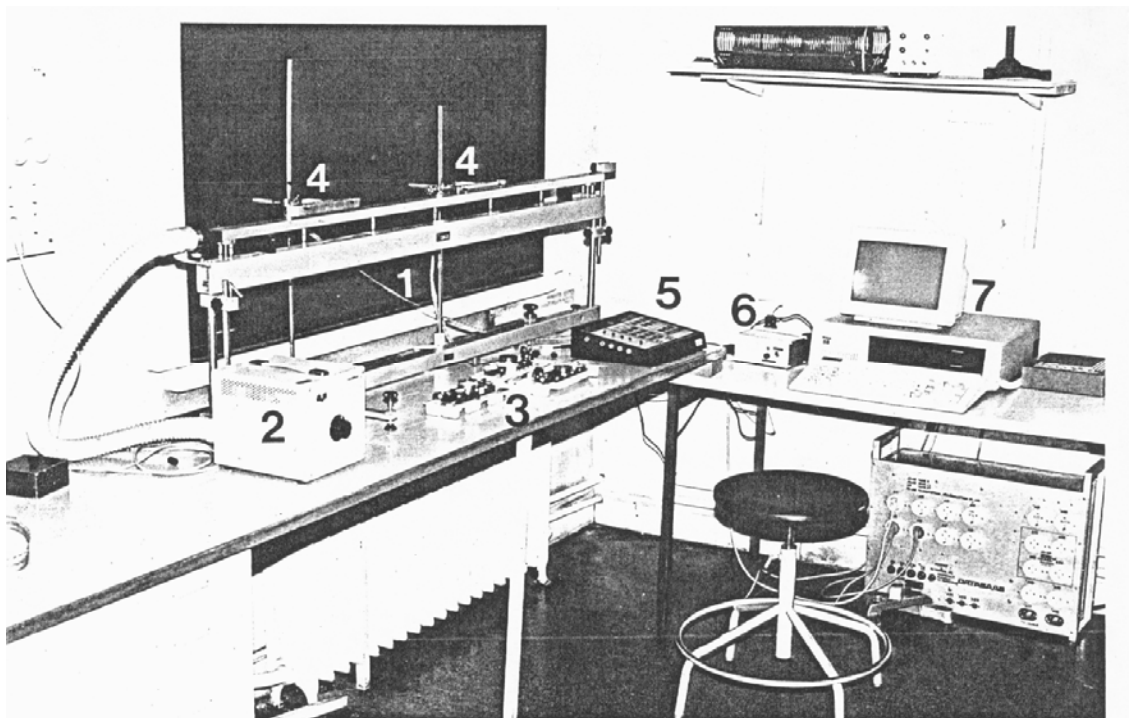
$$1/k_P + 1/k_Q = 1/k_{(P+Q)} \quad \text{eli} \quad m_P + m_Q = m_{(P+Q)} .$$

Tarkastelu osoittaa, että hitaan massan määrittelyn perustaksi tarvitaan vain kinemaattisia liikesuureita, jotka perustuvat etäisyyden ja aikavälin käsitteisiin, sekä tietenkin inertiaalikoordinaatistoa, joka nojautuu jatkavuuden lakiin. Sen asema suurehierarkiassa on sen tähden heti näiden jälkeen. Erityisesti se on ennen impulssia ja voimaa, joiden määrittely tulee mahdolliseksi vasta kun hidas massa tunnetaan.

Käyttämällä näin määriteltyä hidasta massaa tarkastelun lähtökohtana oleva kokeellinen laki voidaan kirjoittaa muotoon $m_Q \Delta v_Q = -m_P \Delta v_P$, joka tarjoaa mahdollisuuden impulssin käyttöön ottamiseen törmäyksen voimakkuutta kuvaavana suureena. Törmäyksen vaihtaminen "pehmeämpään" vuorovaikutukseen ja nopeudenmuutosten määrittäminen hyvin pienillä aikaväleillä johtaa vastaavasti lain hetkelliseen muotoon $m_Q \mathbf{a}_Q = -m_P \mathbf{a}_P$, missä nopeudenmuutokset ovat vaihtuneet kiihtyvyyksiksi.

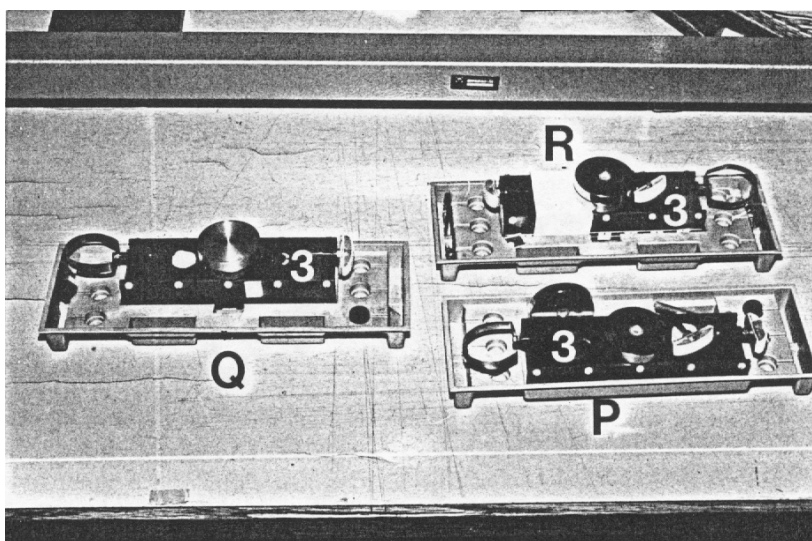
5. Demonstraatiolaitteisto

Esitetyn ajatuskulun demonstroimiseksi rakennettiin kuvan 1 mukainen laitteisto. Kuvassa näkyvät laitteiston osat ovat: ilmatyönyrata (1), radan puhallin (2), vaunut (3), heijastusanturitelineet (4), erikoistunut mittaustietokone VELA (Versatile Laboratory Aid, Educational Electronics) (5), kytkentäyksikkö (6) ja mikrotietokone OSBORNE 5T (7).

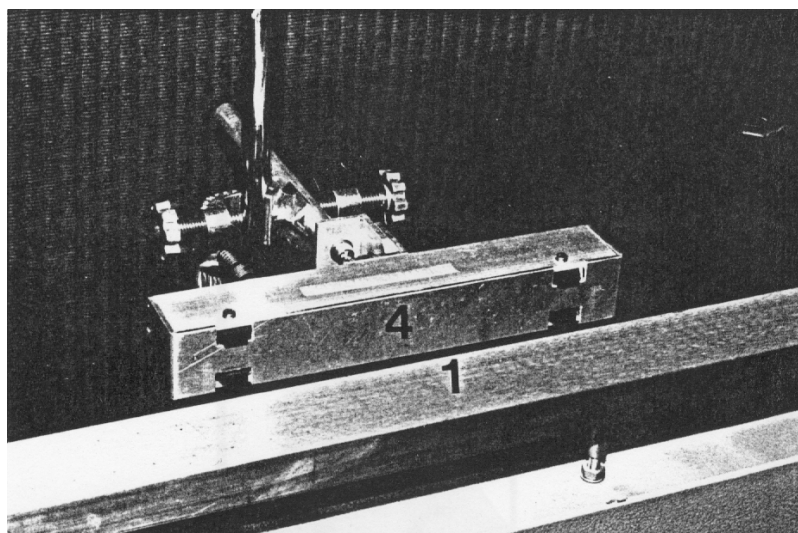


KUVIO 1. Demonstraatiolaitteisto.

Ilmatyynyradan vaunujen (kuva 2) liikettä tarkkaillaan heijastusilmaisimien avulla. Ilmaisimeen kuuluu infrapunaledi ja valotransistori. Ne on koteloitu niin, että ilmaisimen eteen osuvasta peilistä heijastuva infrapunavalo saa transistorin johtavaan tilaan. Kun peili poistetaan, transistori lakkaa johtamasta. Yhteensä kahdeksan ilmaisinta oli kiinnitetty kahteen telineeseen kahdelle eri korkeudelle (kuva 3). Kuhunkin vaunuun kiinnitettiin peililiuska siten, että samanaikaisesti radalla olevien kahden vaunun liuskat olivat aina eri korkeuksilla ja kummankin liikettä tarkkaili omat neljä ilmaisinta.



KUVIO 2. Törmäytettävät vaunut.



KUVIO 3. Heijastusilmaisinteline.

KytKentäyksikkö vastaanottaa heijastusilmaisimien esivahvistimista tulevat jännitesignaalit ja lähettää ne VELAan. Signaalit kulkevat 8-kanavaisen puskurivahvistimen kautta, jonka tarkoituksena on varmistaa, että VELAan lähtevät signaalit ovat TTL-tasoisia (Transistor-Transistor Logic), ja suojata VELAa mahdollisilta ylijännitteiltä. KytKentäyksikössä on stabiloitu 5 V:n jännitelähde heijastusilmaisimien ledejä ja esivahvistimia sekä puskurivahvistinta varten.

VELA on mikroprosessoriohjattu monikäyttöinen mittaus- ja tiedontalennuslaite, jota tässä käytetään monikanavaisena ajastimena. Monikanavainen ajastinohjelma on valmiina VELAn ROMissa (Read Only Memory). Kun ohjelma käynnistetään, VELA alkaa lukea digitaalista sisäänmenoporttiaan, johon signaalit saapuivat heijastusilmaisimista. VELA lukee näin rinnakkaismuotoisia, 8-bittisiä tavuja, joiden bittien arvot vastaavat heijastusilmaisimien tiloja. Neljä ensimmäistä bittiä on vaunua A, neljä viimeistä vaunua B varten. Normaalitylannetta vastaa binaariluku 00000000. Kun vaunu tulee sen liikettä tarkkailevan ilmaisimen kohdalle, tätä vastaavan bitin arvo muuttuu 1:ksi. Vaunun ohitettua bitti palaa tilaan 0. Esimerkiksi binaariluku 00010000 ilmaisee, että vaunu A on oikeanpuolimmaisien ilmaisimien kohdalla, luku 00000100, että vaunu B on vasemmalta katsottuna toisen ilmaisimien kohdalla.

Mittausohjelman kello käynnistetään painamalla VELAn STAR-kytkintä. Tästä alkaen VELA tallettaa muistiinsa aina sisäänmenoporttiin tulevan tavun muuttuessa sekä muutoshetken 1 ms:n tarkkuudella että muuttuneen tavun. VELAassa on valmiina tiedonlähetysohjelma, jonka avulla mittaustulokset voidaan siirtää mikrotietokoneeseen. Tietokone on ohjelmoitava vastaanottamaan tieto, ts. tallettamaan VELAlta tulevat tavut omaan muistiinsa, ja tuottamaan tarvittavat kättelysignaalit.

Tiedonsiirto VELAsta mikrotietokoneeseen tapahtui rinnakkaisliitäntäkortin avulla valmiilla konekielisellä tiedonsiirto-ohjelmalla, joka tallettaa VELAlta tulevan tiedon mikrotietokoneen muistiin. BASIC-kielinen ohjelma laskee vaunujen nopeudet ennen törmäystä ja sen jälkeen, nopeuksien muutokset ja muutosten suhteen. Lisäksi ohjelma ilmoittaa, miten vaunut liikkuvat radalla, esimerkiksi "vaunu A tuli vasemmalta ja poistui oikealle".

6. Huomioita demonstraation toteutuksesta

Hitaan massan kokeellista perustaa havainnollistavat kokeet voidaan demonstroida esitetyllä laitteistolla yksiulotteisina. Tähän tarvitaan (vähintään) kolme törmäytettävää vaunua P, Q ja R, joista yksi (Q) valitaan yksikkökappaleeksi. Vaunuja törmäytetään pareittain.

Ainakin yhtä paria (P, R) törmäytettäessä tehdään sarja kokeita, jossa vaihdellaan kappaleiden alkunopeuksia ja puskureita suhteen $|\Delta v_P|/|\Delta v_Q|$ invarianssin todentamiseksi. Muissa törmäytyksissä voidaan tyytyä lyhyeen huolellisesti tehtyyn sarjaan kokeita. Näin määritetään parikohtaiset hitaussuhteet k_{PR} , k_{PQ} ja k_{RQ} lain $k_{PR}/k_{QR} = k_{PQ}$ demonstroimiseksi ja määritetään hitaat massat käyttäen yksikkönä vaunun Q hidasta massaa, $m_P = (1/k_{PQ})m_Q$ ja $m_R = (1/k_{RQ})m_Q$. Lisäksi törmäytetään yhdistelmää (P+R) yksikkövaunun kanssa hitaussuhteen $k_{(P+R)Q}$ ja hitaan massan $m_{P+R} = (1/k_{(P+R)Q})m_Q$ määrittämiseksi ja massan additiivisuuden $m_P+m_R = m_{(P+R)}$ toteamiseksi.

Eräissä testimittauksessa käytettyjen vaunujen punnitut massat olivat $m_P = 197,6$ g, $m_Q = 242,6$ g, $m_R = 303,8$ g. Puskureita oli kahta tyyppiä, toiset hyvin kimmoisia, toiset hyvin kimmottomia. Ne kuuluivat luonnollisesti kiinteästi vaunuihin. Erilaisten törmäysten aikaansaamiseksi ne vain käännettiin oikeaan asentoon.

TAULUKKO 1. Testimittauksen tulokset.

Hitaussuhteet	k_{PQ}	k_{RQ}	k_{PR}	$k_{(P+R)Q}$
	1,29	0,87	1,53	1,97
	$\pm 0,05$	$\pm 0,06$	$\pm 0,08$	$\pm 0,08$
Liitântälaki	$(k_{PQ}/k_{RQ}):k_{PR} = 0,97$			
Hitaat massat/ m_Q	m_P	m_R	$m_{(P+R)}$	
	0,78	1,15	1,97	
Additiivisuus	$(m_P+m_R)/m_{(P+R)} = 0,98$			
Punnitut massasuhteet	m_P/m_Q	m_R/m_Q	$(m_P+m_R)/m_Q$	
	0,81	1,25	2,07	

Testimittauksen tulokset on esitetty taulukossa. Hitaussuhteiden virherajat ovat verrattain lyhyiden mittaussarjojen, 4 ... 8 koetta, keskihajontoja. Testi edusti tyypillistä oppilaslaboratoriossa tai nopeassa demonstraatioissa esiintyvää huolellisuustasoa. Käytetyllä laitteistolla on verrattain helppoa saavuttaa 5 %:n tarkkuus kertamittauksissa. Hyvin huolellinen työskentely parantaa tarkkuuden noin 1 prosenttiin, jolloin vertailut jo antavat melko vakuuttavan kuvan laeista.

Kokeen tekniset rajoitukset ja vaikeudet ovat ilmatyynyradan käytölle tyypilliset. Törmäyksiä on vaikeaa toteuttaa niin, ettei niissä tapahdu vaunujen kontaktia rataa tai etteivät vaunut ala värähdellä. Mitä "kovempi" vaunujen vuorovaikutus on, sitä vaikeammaksi tämä tulee. Erityisesti tämä vaikeutti kokeita kimmottomilla puskureilla, jolloin törmäys oli varsin äkkinäinen. Kimmoisillakaan pusku-reilla törmäykset eivät onnistuneet hyvin, jos vaunujen alkunopeuksien erotus oli suurempi kuin 0,5 m/s.

Vaunujen massoja on mahdollista varioida vain hyvin rajoitetusti. Niiden liukumisen kitkattomuus ja erityisesti törmäyksen onnistuminen riippuu lisäksi varsin herkästi vaunujen muodosta.

Laitteiston kriittinen osa oppilastöiden kannalta on itse ilmatyynyrata. Sen pitäminen (oppilaslaboratorion olosuhteissa) puhtaana, pölyttömänä ja täysin vääntymättömänä, mitä sillä tehtävät kvantitatiiviset kokeet ehdottomasti vaativat, on vaikeata. Radan kunto pitää säännöllisesti testata.

Esitettyjen kokeiden suorittamisesta luentodemonstraationa on toistaiseksi niukasti kokemusta. Syynä on se, ettei Helsingin yliopiston Fysiikan laitoksella ole sopivia demonstraatioiden valmistelutiloja luentosalien yhteydessä ja laitteiston virittäminen toimintavalmiiksi nopeata demonstraatiota varten vie verrattain runsaasti aikaa. Harjoittelukäytössä täydellisen mittaussarjan läpivienti on onnistunut noin 20 minuutissa. Nopeuden kannalta mittausten ja tulosten käsittelyn automaattisuus on tietenkin ratkaisevaa. Selvin puute luentodemonstraatioita ajatellen on mikrotietokoneen näytön pienuus.

Fysiikan peruskurssin I laboratoriotöissä laitteisto otettiin käyttöön syksyllä 1987. Oppilastyönä kokeet vievät hyvin ohjattuina noin 1 tunnin tai vähän yli. Pelkästään laitteiston esittelyyn kuluu assistentilta 5–10 minuuttia.

Ensimmäiset kokemukset ovat olleet rohkaisevia. Alkuvaiheen palaute on ollut myönteistä. Työ on liittynyt hyvin luennoilla ja oppikirjassa esitettyihin ajatuksiin, ja sen tekee mielenkiintoiseksi mittauksissa käytettävä nykyaikainen uusi tekniikka. Toistaiseksi tämä onkin ainoa peruskurssin harjoitustyö, jossa käytetään mikroprosessoritekniikka.

Periaatteellisena puutteena on luonnollisesti pidettävä koetilanteen yksiulotteisuutta. Kokeen ajatus voidaan varmasti toteuttaa myös kaksiulotteisesti käyttämällä ilmatyynypöytää, jolloin törmäysten luonteen vaihtelumahdollisuudet lisääntyvät ratkaisevasti. Voidaan esimerkiksi käyttää epäsäännöllisemmän muotoisia ja pyöriviä kappaleita. Tarkasteltavien lakien yleisyys korostuu, samalla kun nopeudenmuutosten vektoriluonne tulee selvästi näkyviin. Ei kuitenkaan ole helppoa löytää riittävän halpaa ratkaisua automaattisten nopeudenmittausten toteuttamiseksi, joka on välttämätön näiden kokeiden tekemiseksi demonstraationa tai peruskurssin oppilastyönä.

Lähteet

- Kurki-Suonio, K., Kervinen, M. & Korpela, R. 1982. KVANTTI 1, Fysiikan laaja oppimäärä, Espoo: Weilin & Göös.
- Kurki-Suonio, K., Kervinen, M. & Korpela, R. 1985. KVANTTI 3b, Fysiikan laaja oppimäärä, Espoo: Weilin & Göös.
- Kurki-Suonio, K. & Kurki-Suonio R. 1987a. Everybody physics eli Fysiikan peruskurssi I. Helsinki: Limes ry.
- Kurki-Suonio, K. & Kurki-Suonio R. 1987b. Somebody physics eli Fysiikan peruskurssi II. Helsinki: Limes ry.
- Kurki-Suonio, K. & Kurki-Suonio R. 1988. Kokeellisen ja teoreettisen lähestymistavan tuntomerkit fysiikan opettamisessa. Teoksessa J. Laurén (toim.) Kokeelliseen fysiikan ja kemian opetukseen. Jyväskylän yliopisto 1988. Kasvatustieteiden tutkimuslaitoksen julkaisusarja B. Teoriaa ja käytäntöä **28**, 29-42.
- Seinelä, K. 1987. Kokeellis-induktiivisen menetelmän toimivuus lukion ensimmäisen luokan fysiikan opetuksessa. Piaget'n teoriaan perustuva tutkimus. Helsingin yliopiston opettajankoulutuslaitos. Tutkimuksia 47.