

Energian perushahmot¹

Kaarle Kurki-Suonio

Didaktinen fysiikka, Fysiikan laitos, PL 9, 00014 Helsingin yliopisto

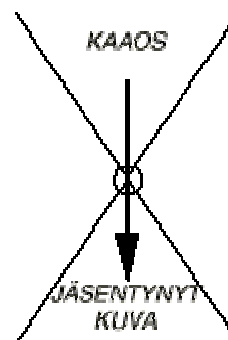
Prosessin ja tuotteen ristiriita

Prosessin ja tuotteen ristiriita on kaiken opetuksen perusongelma. Oppiminen on oppilaan oma etenevä ja hierarkkisesti kehittyvä prosessi, joka alkaa ihmisen syn-tyessä. Opettajan pitäisi ylläpitää ja kannustaa prosessia ja ohjata sen kehittymistä, auttaa oppilasta näkemään ongelmia, tekemään kysymyksiä, itse pohtimaan ja etsimään ratkaisuja. Opittavat "asiat" on kuitenkin helpompi tarjota tuotteina, lopul-lisina tuloksina, tiivistettyinä määritelminä ja valmiina malleina, jotka torjuvat oppi-laan kysymykset ja ajattelun ja pysäyttävät prosessin. Tämä on opetuksen vahva perinne, joka näkyy oppikirjojen vakiintuneessa esitystavassa [2].

Fysiikassa on samalla kyseessä ympäristölähtöisen ja teoreettisen lähestymistavan vastakkaisuus. Prosessi merkitsee hierarkkisesti kehittyvää havaintojen ja mielikuvien vuorovaikutusta, joka voi alkaa vain ha-vainnoista. Se alkaa kaaoksesta ja etenee hahmotta-van tunnistuksen ahtaan portin kautta käsitteistämi-seen ja sen avulla asteittain jäsentyvään kuvaan ympäristöstä.

Teoreettisessa lähestymistavassa halutaan antaa oppilaille heti parasta mitä, tutkimus on tuottanut, ympäristön koko ilmiömaailman hallintaa yleisten perus-käsitteiden ja -lakien avulla, joita tarvitaan vain kourallinen. Näin aletaan jostakin, joka näyttää prosessin valmiilta tuloksilta, kuvitellen, että ne voidaan omaksua il-man prosessia.

Teoreettista lähestymistä puolletaan tieteellisyytenä. Tämä on luonut keinotekoi-sen vastakkainasettelun myös fysiikan ja teknologian välille. Kun tieteellisyys sa-mastetaan teorialähtöisyyteen, teknologiakasvatus tarjoutuu kokeellisuuteen ja ympäristölähtöisyyteen perustuvaksi helpoksi ja käytännönläheiseksi tavaksi tar-kastella ympäristöä fysiikan abstraktin ja vaikean tiedekasvatuksen sijasta [9].



¹ Teoksessa "Matemaattisten aineiden opetus ja oppiminen." Matematiikan ja luonnontieteiden opetuksen tutkimusseura ry:n päivillä Oulussa 18.–10.10.1996 pidetyt esitelmät ja alustukset. toim. Sinikka Kaartinen. Oulun yliopiston kasvatustieteiden tiedekunnan opetusmonisteita ja selosteita 78/1998, 62–74.

Tieteellisyys ei kuitenkaan piile tuotteissa vaan prosessissa, eivät tulokset siinänsä ole tieteellisiä vaan tapa, jolla tulokset syntyvät. Tiede on ihmiskunnan yhteinen suuri kulttuuriprosessi. Se etenee yhteen suuntaan, havainnoista luonnon asteittain syvenevään ymmärtämiseen. On absurdia kuvitella, että tiede, jonka tavoitteena on uuden tiedon etsiminen ja ymmärryksen luominen, voisi lähteä liikkeelle valmiista tuloksista. *Teoreettinen lähestymistapa on opetuksen luoma äärimmäisen epätieteellinen harhakuva.*

Käsitteiden paljous

Fysiikan opetusta moititaan usein liian monien käsitteiden käyttämisestä. Vedotaan nk. Occamin partaveitseen ja vaaditaan tyytymistä harvempiin käsitteisiin. Erityisesti on osoitettu sormella erilaisten energiakäsitteiden määrää.

Tässäkin moitteessa kummittelee teoreettisen lähestymistavan perusidea, jonka mukaan käsitteitä poimitaan valmiista tuoteluettelosta ja katsotaan, mihin ne kelpaavat. Empirialähtöinen opetus toimii toisin päin. Käsitteitä otetaan käyttöön vain sitä mukaa kuin niitä tarvitaan esittämään ympäristöä havaitsemalla hahmottuvia merkityksiään. Käsite ei yksinkertaisesti voi olla tarpeeton.

Prosessissa kohdataan ympäristön koko moninaisuus, jonka jäsentämiseen tarvitaan aluksi paljon suppeita ilmiökohtaisia käsitteitä. Vasta prosessin edetessä käsitteet yhdentyvät ja yleistyvät kattokäsitteiksi. Ei Occam oikeuta ajattelemaan, että "tuoli", "pöytä", "sohva", "kirjahylly", "lipasto", "sänky" jne. ovat tarpeettomia sanoja ja että lapsille on helpompaa, jos ne kaikki ovat vain yksinkertaisesti "huonekaluja". Tai, miksi jäädä tähän, vielä paljon vähemmällä käsitteillä lapsi pääsisi käyttämällä vain sanaa "kappale" tai "esine". Yleinen käsite on ymmärrettävissä vain niiden alakäsitteiden kautta, jotka se yhdistää.

Occamin partaveitsi on kaikkien käsitteistämiseen kuuluvan yhdentymiskehityksen periaate, tieteen prosessin kaukainen tavoite. Fysiikan utopia, TOE (Theory of everything) toteuttaisi sen lopullisesti palauttamalla kaiken yhteen ainoaan peruskäsitteeseen. Mikä ajansäästö tällöin saavutetaankaan teoreettisen lähestymistavan mukaisessa fysiikan opetuksessa, kun ilmoitettavaksi jää enää yksi ainoa käsite!

Prosessin vaiheet

Fysiikan opetuksessa prosessin etenemisen hierarkkista rakennetta hallitsee jako 1. *kvalitatiiviseen* ja 2. *kvantitatiiviseen* vaiheeseen [5: 2.4, 5: 4.1.3, 5: 4.2, 8: 3].

Ympäristön ja sen jokaisen ilmiöalueen jäsentyminen alkaa kvalitatiiviselta tasolta havaintojen *perushahmotuksesta*. Sen operaatiota ovat tunnistus ja luokittelu, joiden kautta kaikesta havainto- ja kokemusaineistosta hahmotetaan tunnistettavia ja nimettäviä olioita ja ilmiöitä ja niiden ominaisuuksia.

Esikvantifiointi kiinnittää huomion ominaisuuksien eri asteisiin, nk. komparatiivisiin hahmoihin, suuruuksiin, voimakkuuksiin, suuntiin jne., jotka tekevät mahdolliseksi eri olioiden tai ilmiöiden saman ominaisuuden vertailemisen, ominaisuuden muuttumisen tai säilymisen havaitsemisen sekä ominaisuuksien välisten korrelaatioiden todentamisen. Kvalitatiivisella tasolla voidaan näin päätyä ominaisuuksien syysuhteita koskevien mielikuvien rakentamiseen ja kehittämiseen vertaamalla mielikuvien mukaisia odotuksia ja päätelmiä havaintoihin.

Kvantitatiiviselle tasolle tullaan, kun kvalitatiivinen vertailtavuus ei riitä, vaan joku keksii kysyä: "kuinka suuri, kuinka voimakas". Sen käsitteitä ovat *suureet*, *lait* ja *teoriat*. Koska lait ovat suureiden välisiä riippuvuuksia ja teoriat lakien muodostamia käsitteellisiä rakenteita, näitä voidaan pitää kolmena hierarkkisesti eriasteisena käsitetasona.

Kvantitatiivinen käsitteistö rakentuu kvalitatiiviselle. *Kvantifiointi* on kynnyksprosessi, jossa ominaisuudet muunnetaan mitattaviksi suureiksi. Ominaisuuksien väliset riippuvuudet kvantifioituvat laeiksi ja kausaalimielikuvat teorioiksi ja kvantitatiivisiksi malleiksi.

Hahmottavaa lähestymistapaa luonnehtii kaksi keskeistä periaatetta:

1. Prosessin *dynamiikka on kaksisuuntainen*. Se perustuu havaintojen (empiriin) ja mielikuvien (teorian) erottamattomuuteen, ja merkitsee opetuksessa tietoista pyrkimystä oppilaan mielikuvien aktivointiin ja aktiiviseen rakentamiseen empirian perusteella.

2. Prosessi *etenee yhteen suuntaan*, joka on samalla suunta empiriasta teoriiaan, konkreettisesta abstraktiin, spesifisestä yleiseen ja yksinkertaisesta rakenteelliseen. Tämä merkitsee käsitteiden rakentumista havaintojen perusteella hahmotuvista merkityksistään, kvantitatiivisen käsitteistön rakentumista kvalitatiiviselle ja käsitejärjestelmän hierarkkista rakentamista sekä kvalitatiivisella että kvantitatiivisella tasolla.

Energia, mikä ihmeen energia?

Energia on fysiikan tärkeimpiä käsitteitä sekä teoreettiselta että käytännölliseltä kannalta. Se yhdistää toisiinsa kaikki fysiikan ilmiöalueet ja teoriat. Klassisen mekaniikan kehityksessä tapahtuneessa "invarianttien vallankumouksessa" [3, 7] energiasta tuli teorian perussuure. Energiapohjaiset käsitteet ovat klassisen mekaniikan uudempien muotojen perussuureita, ja kvanttimekaniikan peruslait ovat energialakeja.

Vuosisadan vaihteessa levisi energetiikaksi kutsuttu ajattelutapa, jonka mukaan kaikki fysiikka palautui tai tuli palauttaa energiaan. Energia yleiskielistyi ja samalla epämääräistyi normaalikielen hahmottomaksi käsitteeksi, jota kaikki käyttävät mutta jonka merkityksestä tuskin kukaan tietää mitään.

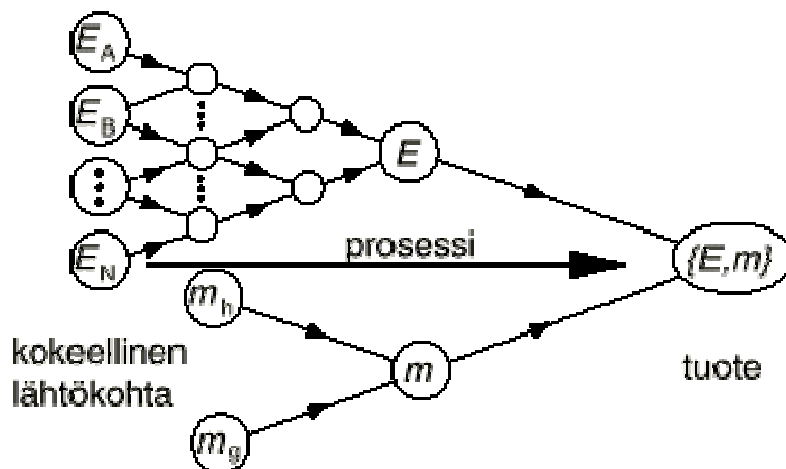
Energia on varmasti yleisin käytännön elämässä ja julkisessa keskustelussa käytetty fysiikan käsite. Se on päivänpolttava aihe keskustelun ja päätännän kaikilla hierarkkisilla tasoilla yksilötasolta maailmanpolitiikkaan. (Kuinkahan moni tulee tällöin ajatelleeksi, että ENERGIA ON SUURE?) On ilmeistä, että energian käsite kuuluu yleissivistykseen ja fysiikan opetuksen pitää antaa perustiedot siitä mahdollisimman varhain. Energia on kuitenkin hyvin yleinen käsite, se on myös äärimmäisen abstrakti ja sellaisena vaikea. Täsmällisenä kvantitatiivisena käsitteenä käsitehierarkiassa hyvin korkealla eikä ei ole opetettavissa kovin varhain. Ainakin peruskoulussa sen käsittelyn on rajoitettava pääasiassa perushahmotukseen ja esikvantifiointiin eli kvantitatiivista käsitteistöä ennakoivien energian perushahmojen tunnistamiseen ympäristössä.

Energian – kuten kaikkien suureiden – merkityksen hahmottumisen välttämättömät lähtökohdat, ymmärtämisen avainkysymykset, ovat *kiinnitys ja luonnehdinta* [5: 3.2, 5: 4.3] eli: (1) minkä olioiden tai ilmiöiden (2) millaista ominaisuutta esittämään tätä suureta tarvitaan? Kysymykset ovat ongelmalliset juuri siksi, että energia sellaisena käsitteenä kuin sen nykyisin tunnemme on niin yleinen ja abstrakti.

Kiinnitys, minkä energia?

Energia liittyy *kaikkiin olioihin ja ilmiöihin!* Tämä on äärimmäisen epäkiitollinen lähtökohta. Ei empirian kautta voi lähteä rakentamaan käsitteitä yhtäaikaa kaikista ilmiöistä. Kaikki on yhtä hyvä kuin ei mikään. Ei se tarjoa kahvaa, johon tarttua.

Kokeellisesti voidaan tarkastella vain yhtä ilmiöluokkaa kerrallaan siihen liittyvien energia-ominaisuuksien hahmottamiseksi. Kullakin olio- ja ilmiöluokalla on omat *energiälajinsa*. Empiria alkaa niistä. Siten havaintojen kannalta energia on hyvin monia käsitteitä yhdistävä kattosuure, pitkän yhdentymiskehityksen tulos.



Taulukko: Energian lajit ja niiden kiinnitykset

Oliot, ilmiöt	Energian laji
<i>KLASSINEN FYSIIKKA</i>	
Kappaleet, liike	Liike-energia
Vuorovaikutukset	Potentiaalienergia
	Mekaaninen energia
– vapausasteet	– sisäinen / ulkoinen
– vuorovaikutuksen lajit	– eteneminen, pyöriminen ...
Kentät, kenttien lajit	Kentän energia, lajit
Aine, aineen ominaisuudet	"Lämpöenergia", latenttienergia, kemiallinen energia, kimmoenergia, sähköinen energia, magneettinen energia ... => sisäenergia
Aallot, Säteily: lajit	Aalto-/säteilyenergia: lajit
– ääni, valo, ...	
=> Hiukkaset, aallot	=> liike-energia, aineen / kentän etenevä energia
<i>MODERNI FYSIIKKA</i>	
Atomaarinen aine	Rakennneosien liike-energia, vuorovaikutusten potentiaalienergia – vapausasteet
Kvantittuneet kentät	Kvanttien energia / energianvaihto
Suhteellisuusteoria	Energian ja massan ekvivalenssi Aine energian lajina

Käsitys energian lajeista on sidottu käsitykseen olio- ja ilmiöluokista, joka muuttuu maailmankuvan kehittyessä. Käsitykset olioista, ilmiöistä ja niiden luokittelun perusteista ja samalla myös käsitys energian lajeista on kokenut monia muutoksia.

Newtonin mekaniikan perusolioina ja -ilmiöinä olivat kappaleet, niiden liike ja vuorovaikutukset. Vastaavasti oli kaksi mekaanisen energian lajia, kappaleen liike-energia ja vuorovaikutuksen potentiaalienergia. Puhe kappaleen potentiaalienergiasta on käsitteen väärää kiinnittämistä, joka johtuu keinotekoisesta rajoittumisesta yhden kappaleen dynamiikkaan ja perinteisen opetuksen vuorovaikutuksesta irrotettuun mystiseen voiman käsitteeseen. Tällainen puhetapa voidaan perustella vain tietoisella idealisoinnilla, jossa vuorovaikutuksen toinen osapuoli on hyvin suuri.

Sähkömagnetismin kehitys korvasi vuorovaikutukset kentillä, joista tuli klassisen fysiikan perusolioiden toinen päälaaji. Vaikka potentiaalienergian käyttö käsitteenä ei tähän loppunutkaan, periaatteessa sen tilalle astuivat energian lajeina kenttien energiat, klassisen fysiikan puitteissa siis sähkökentän, magneettikentän ja gravitaatiokentän energia.

Jatkuva aine on toinen klassisen fysiikan käyttämä olion malli. Aineen ilmiöiden

runsautta vastaa tähän malliin liittyvä suuri joukko aineen energian lajeja, jotka yhdenyttyvät termodynamiikassa yhtenäiseksi sisäenergian käsitteeksi.

Klassisen fysiikan perusilmiöihin kuuluvat vielä erilaiset aallot ja säteilyt, kuten valo ja ääni. Niihin liittyvät energian lajit ovat väliaineessa tai kentässä etenevää energiaa, ja vain tämä etenemisen aspekti erottaa ne lajeina kenttien energioista ja jatkuvan aineen energian lajeista.

Siirtyminen aineen atomaarisen rakenteen fysiikkaan yksinkertaistaa käsitystä energian lajeista palauttamalla kaikki jatkuvan aineen energian lajit hiukkasten liike-energioihin ja vuorovaikutusten potentiaalienergioihin ja edelleen kenttien energioihin. Varsinainen modernin fysiikan kausi tuo kaksi olennaista muutosta, massan yhdistymisen energiaan sekä vuorovaikutusten ja kenttien energioiden kvantittumisen, joka johtaa edelleen käsitykseen kenttien kvanttirakenteesta. Kaikki energia palautuu näin hiukkasten lepo- ja liike-energioihin.

Havainnoista alkaminen merkitsee samalla alkamista tämän kehityskulun alusta, klassisen fysiikan ilmiöalueista, vaikka modernin fysiikan mukaisia yhdentäviä tulintoja voikin pitää esillä mainintoina.

Luonnehdinta, mikä ominaisuus?

Koska energia kiinnittyy erikseen kuhunkin olioiden ja ilmiöiden luokkaan energian eri lajeja edustaviksi energiakäsitteiksi, myös luonnehdinta koskee erikseen kutakin energian lajia. Koska lajit kuitenkin yhdistyvät toisiinsa eriasteisiksi kattokäsitteiksi, tarkasteltavan ominaisuuden on oltava jotakin, joka on kaikille olioille ja ilmiöille jollakin tavalla yhteistä.

Perinteinen luonnehdinta "energia on kyky tehdä työtä" on tyyppiesimerkki fysiikan opetuksen "kanonisista puolitotuuksista" [5: 4.1.4]. Sen rajoittunut näkökulma kytkee energian pelkästään mekaniikkaan. Useimpiin energialajeihin se ei liity mitenkään tai liittyä vain hyvin epäsuorasti ja keinotekoisesti. Tällainen "määrittely" jää sen tähden empirian kannalta mystiseksi. Kvantifiointia ajatellen se on myös väärää ennakkointia, koska työ suurena voidaan määritellä vasta, kun energia tunnetaan.

Yleensä energialla ei ole mitään ilmeistä taipumusta "tehdä työtä", pikemminkin kaikki energia pyrkii muuttumaan lämmöksi. Miksei siis "määriteltäisi" mieluummin: "energia on kyky lämmittää"? Tämä olisi empirian kannalta paljonkin selvempi, koska kaikkien energian lajien muuntuminen lämmöksi on helppo havaita. Se liittyy luonnossa vallitsevan energian huononemisen lain vuoksi paljon luontevammin kaikkiin energian lajeihin.

"Kyky tehdä työtä" voidaan nähdä myös teknologian saappaanjäljeksi: "energia

on jotakin, jota tarvitaan, jotta koneet toimisivat". Se edustaa sinänsä kiitettävää pyrkimystä lähteä liikkeelle "käytännöstä". Toisaalta lähtökohdaksi voitaisiin ottaa yhtä hyvin nykyaikaisempi "high-tech" -näkökulma ja "määritellä": energiaa kykynä luoda järjestystä.

Kaikki tämän tyyppiset luonnehdinnat ovat ilmiöspesifisiä osatoukuksia. Energiaa tarvitaan työhön, lämmittämiseen ja järjestämiseen, mutta mikään näistä ei yksinään, eivät edes kaikki kolme yhdessä, voi kelvata kaikkia ilmiöitä koskevan energian käsitteen määritelmiksi. Ne sivuuttavat pääasian, säilymisen. Energia esittää olioiden ilmiöissä säilyvää ominaisuutta. Kaikissa käsitteen kehitysvaiheissa säilymislaki toimii sen määrittelylakina [5: 3.2].

Työn tekeminen, lämmöksi muuttuminen ja järjestyksen luominen ovat kaikki ilmiöitä, joissa energian laji muuttuu. Käsitteenmuodostuksen perusvaiheen energia, ilmiöluokan energian laji, ei niissä säily. Näitä ilmiöitä on tarkasteltava silloin, kun energian lajeja esittäviä suureita yhdistetään ilmiöalueita yhdistäviksi kattokäsitteiksi. Ilmiöluokan säilyvä ominaisuus on tunnettava, ennen kuin voidaan ryhtyä täsmentämään sen kulumista tai muuntumista kuvaavia käsitteitä. Ne kuuluvat perushahmotuksen kokonaisuuteen, mutta energian käsitteen kvantifioinnin perustaksi ne eivät sovellu.

Pelkkä säilyminen on kuitenkin mitänsanomaton. Kappaleen potentiaalienergia säilyy, kun se on paikallaan, sen liike-energia säilyy, kun se etenee tasaisesti, eristetyin termodynaamisen systeemin sisäenergia säilyy. Mutta ilmiö, joka on pelkkää säilymistä, ei kelpaa lähtökohdaksi. Säilyvä ominaisuus voi hahmottua mielekkäästi vain, kun se ilmenee säilymisenä muutoksissa.

Ilmiöiden moninaisuus tekee myös säilymisestä hyvin monimuotoisen. Ominaisuudet, jotka säilyvät, on hahmotettava erikseen kussakin yhteydessä, erityyppisille olioille ja systeemeille, erilaisissa ilmiöissä, eri olioiden vuorovaikutuksissa ja tilanteissa, joissa erilaiset ilmiöt kytkeytyvät yhteen. Energian yhteydessä on kysyttävä erikseen jokaisen ilmiö- ja olioluokan ja energian lajin osalta: *Mikä säilyy ja miten säilyminen ilmenee?* Hahmotus etenee asteittain yleistävien kysymysten ketjuna: Mikä säilyy ilmiössä => ilmiöluokassa => monen ilmiön prosesseissa => kaikissa ilmiöissä? Ketjun jokainen vaihe johtaa uuteen, yleisempään säilymisen havaintoon, kunnes päädytään johonkin, joka säilyy kaikissa ilmiöissä.

Mielikuvien rakentaminen

Hahmottavaa lähestymistapaa tarkasteltaessa esitetään usein kysymys *yleiskielen ja terminologian suhteesta*. Lähdetessä liikkeelle valmiista määritelmistä kysymystä väistetään, koska käsite otetaan käyttöön heti ja sen ajatellaan sitten olevan käytettävissä määritellyssä merkityksessään. Yleiskieliset merkitykset koetaan tällöin vain oppilaan väärinä "epätieteellisinä" mielikuvina ja ennakkokäsityksinä, jot-

ka on poistettava ja korvattava annetuilla "tieteellisillä" käsityksillä.

Ympäristölähtöinen hahmottava opetus alkaa aina kvalitatiiviselta tasolta, jossa tarkastelut nojautuvat yleiskieliseen keskusteluun. Yleiskieli, sellaisena kuin oppilas sitä käyttää, edustaa merkityksineen ja epämääräisyyksineen sitä oppilaan mielikuvarakennetta, jolle oppiminen rakentuu ja jonka kehittäminen on oppimisen tarkoitus. Se sisältää monia sanoja, joille fysiikka antaa uuden täsmällisemmän terminologisen merkityksen. Myös energia on yleiskielen käsite. Energiasta voi ja pitääkin puhua tältä pohjalta alusta alkaen. On vain tiedostettava, että sitä käytetään aluksi kvalitatiivisesti ja että se saa aikanaan kvantifiointien kautta täsmällisen merkityksen suureena.

Säilyminen on ihmismielen vahvimpia luontaisia perushahmoja, joita voidaan sanoa mielen arkkityypeiksi. Säilyminen on olemassaolon edellytys ja siten kaiken olemassa olevan perusominaisuus. Samalla se kytkeytyy aineeseen, joka on meidän tajunnassamme fyysikaalisen ilmiömaailman perusolevaa. Ominaisuuden säilyminen merkitsee aineenkaltaisuutta. Säilymistä pyritään näkemään silloinkin, kun se ei ole ilmeistä. Ominaisuuden heikkeneminen tulkitaan ensisijaisesti tuon aineenkaltaisen siirtymisenä muualle, ei sen häviämisenä, ja empiriasta etsitään tukea tälle ajatukselle tavoittelemalla ideaaliolosuhteita, joissa heikkenemistä ei esiintyisi. Tällä tavalla varaus on tulkittu sähkönesteeiksi, magneettisuus magneettinesteeksi, lämpö caloric-aineeksi.

Yleiskieli nojautuu ihmismielen primaariseen hahmotustapaan [4]. Sen tähden se (sala)kuljettaa ja tukee mielikuvia, jotka ovat esiintyneet myös tieteen historiasa ilmiöiden ensimmäisinä malleina. Säilymisen mielikuva on vahvasti mukana energian yleiskielisissä merkityksissä. Se kytkeytyy kaikkeen puheeseen energian varannoista, lähteistä, riittävydestä, siirrosta, kulutuksesta, tarpeesta, säästämisestä jne. Oppilailla on sen tähden energialle valmiina koko joukko oikeansuuntaisia merkityssisältöjä, jotka kaipaavat vain esiin vetämistä ja vahvistamista ja rakentamista muodostuakseen fyysikaalisia energiakäsitteitä edeltäviksi perushahmoiksi.

Aineenkaltaisuus ajatus ei sellaisenaan rasita energiaan liittyviä mielikuvia, pikemminkin se tukee niitä. Se karsiutuu asteittain pois käsitteen kehittyessä tullakseen sitten suhteellisuusteorian mukana uudelleen ajankohtaiseksi uudessa valossa uutena probleemana. Tällöin ollaan kuitenkin käsitteellisesti riittävän pitkällä sen ymmärtämiseksi, ettei energian samastuminen massaan ole kuitenkaan samastumista aineeseen.

Energiakaaviot

Energiakäsitteiden havainnollistamiseksi on oppikirjoissa käytetty kautta aikojen erilaisia piirroksia ja kaavioita, joiden kehittyneimpiä versioita ovat tutkimustulosten esittämiseen käytetyt energiatasokaaviot. Galilei-sarjaa varten [1], jossa hah-

mottavan lähestymistavan periaatteita on tietoisesti toteutettu niin pitkälle kuin on osattu ja ymmärretty, energiakaavioiden perusideaa on pyritty kehittämään siten, että kaavioita voitaisiin käyttää systemaattisesti vahvistamaan energiakäsitteitä edeltävien perushahmojen hahmottumista havainnoista ja edelleen rakentumista fysikaalisiksi käsitteiksi.

Energiakaaviot eivät ole sinänsäkään tuote vaan prosessin väline, joka kehittyy itsekin käsittelyn edistyessä. Siten kaavioita käytetään sekä kvalitatiivisessa perushahmotuksessa, erilaisten ilmiöiden tarkasteluun energian kannalta, että esikvantifioinnissa hahmottamaan käyttöön otettavien erilaisten energiasuureiden merkityksiä ja suureiden välisiä relaatioita. Tämän päätarkoituksen ohella niitä voidaan käyttää myös kvantitatiivisesti tulosten määrällisten suhteiden havainnollistamiseen esimerkkitaapauksissa.

Yksinkertaisimmillaan kaavio esittää ilmiön alku- ja lopputilaa kahtena rinnakkaisena laatikkona. Ilmiöt kuvataan – länsimaisen tavan mukaisesti – vasemmalta oikealle eteneviksi. Energian säilymistä havainnollistaa kaaviossa laatikoiden korkeuksien yhtäsuuruus [1: G2 s. 52; G8 s. 57]. Laatikoita voidaan jakaa vaakasuorin viivoin osiin, jotka vastaavat energian eri lajeja tai systeemin vapausasteiden energioita [1: G4 s. 72]. Kvantitatiivisessa esityksessä laatikoiden osien korkeudet voidaan piirtää vastaamaan niitä vastaavia energioita [1: G2 s. 58, 83, 84, 94].

Alku- ja lopputilan välistä ilmiötä tai prosessia voidaan haluttaessa havainnollistaa nuolella. Prosessinuolet piirretään vastaavan laatikon tai osan levyisiksi, jolloin ne antavat samalla mielikuvan siirtyvän tai muuntuvan energian määrästä ja niihin voidaan kvantifioinnissa liittää vastaavien energiansiirtoa kuvaavien suureiden merkitykset.

Säilymisen perushahmot

Energiakäsitteiden perushahmoja voidaan eritellä seuraavasti:

1. *Määrällisyys.* Energia on olion (tai ilmiön) määrällinen ominaisuus. Niin erilaisia kuin energian lajit ovatkin, ne mielletään aina joksikin, jota on kappaleella, vuorovaikutuksella, kentällä, aaltoliikkeellä, säteilyllä jne. tietty määrä. Määrällisyyden hahmo on olennainen kaikissa sittemmin opittavissa eri lajeja esittävässä energiasuureissa, joita edustavat kappaleen liike-energia, ainesysteemin sisäenergia, vuorovaikutuksen potentiaalienergia jne. Sähköenergian mainitseminen energian lajiksi taas johtaa ristiriitaan tämän perusmielikuvan kanssa heti kun ymmärretään, ettei sähköenergia ole johtimen eikä siinä liikkuvien elektronien energiaa vaan energiaa, joka siirtyy virtapiirin välityksellä lähteestä käyttökohteeseen.

2. *Mahtuminen.* Energian ymmärretään jakautuvan jollakin tavalla "isäntäolioon-sa" niin, että suureen kappaleeseen tai alueeseen "mahtuu" enemmän energiaa. Mahtuminen liittyy muullakin tavoin systeemin luonteeseen niin, että esimerkiksi toisia aineita on vaikeampi saada lämpenemään tai sulamaan ja vierivä kappale kiihtyy kaltevalla tasolla hitaammin kuin liukkaasti liukuva kappale, joka sijoittaa kaiken saamansa liike-energian etenemisliikkeeseen.

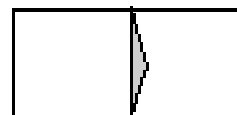
Tämä hahmo valmistaa tietä sellaisille suureille kuin systeemin lämpökapasiteetti ja latenttilämmöt sekä aineen ominaislämpökapasiteetti ja ominaislatenttilämmöt sekä mekaniikan alueella vapausasteen käsitteelle, joka aikanaan kytkee aineen termiset ominaisuudet mekaniikkaan ja muodostuu avainkäsitteeksi kvanttimekaniikkaan johtavien koetulosten merkityksen hahmottamisessa [6].

3. *Energian käyttäytyminen.* Energian mielikuvat liittyvät jo yleisessäkin kielenkäytössä kaikkiin ympäristön ilmiöihin, joten perushahmotusvaiheessa päästään helposti pohtimaan, mitä energialle tapahtuu eri ilmiöissä. Pelkkä ajatus "energialle tapahtuu" sisältää implisiittisesti säilymisen. Siten energian käyttäytymistapojen eri tyypit voidaan ymmärtää "säilymisen perushahmoiksi".

3a. *Muuntuminen – huononeminen.* Energialla on eri lajeja, jotka muuntuvat toisikseen. Painovoiman potentiaalienergia muuntuu putoavan kappaleen liike-energiaksi ja edelleen alustan "lämpöenergiaksi", auringonvalon säteilyenergia voi muuntua aineen kemialliseksi energiaksi ja "lämpöenergiaksi" jne. [1: G2 s. 52, 69; G4 s. 48, 72; G6 s. 39, 42; G8 s. 45, 47, 49, 57, 105, 107, 117].

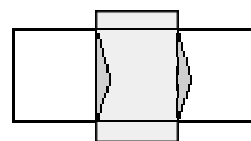
Lämpöenergiaa" voidaan huomata esiintyvän sivutuotteena lähes aina ja ilmiöiden ketjuja tarkasteltaessa eräänlaisena lopullisena "pääteasemana", jolloin huomio kiintyy lajien eriarvoisuuteen ja energian huononemisen periaatteeseen lämpöopin toisen pääsäännön esihahmona [1: G2 s. 59; G6 s. 49; G7 s. 119].

3b. *Siirtyminen.* Energiaa siirtyy vuorovaikutusten välityksellä oliolta toiselle. Näin tapahtuu esimerkiksi aina, kun kappaletta työnnetään tai vedetään liikkeelle [1: G2 s. 61, 65, 71].



Energiaa voi siirtyä myös vapausasteelta toiselle systeemin sisäisten vuorovaikutusten vuoksi. Kaikissa ponnistuksen ja liikkeellelähdön tilanteissa ulkoinen, kappaleen liikettä rajoittava ulkoinen vuorovaikutus toimii myös tällä tavalla; se siirtää sisäisissä vuorovaikutuksissa vapautuvaa energiaa liikkeen sisäisiltä vapausasteilta systeemin ulkoiselle, etenemisen vapausasteelle [1: G4 s. 84]. Myös lämmön siirtyminen kappaleesta toiseen kuuluu tähän luokkaan [1: G2 s. 82–84].

3c. *Välittyminen.* Hyvin yleisiä ovat tilanteet, joissa systeemi samanaikaisesti saa ja luovuttaa energiaa. Kun nämä kaksi ilmiötä ovat tasapainossa, systeemi toimii energian välittäjänä; energia vain siirtyy suoraan

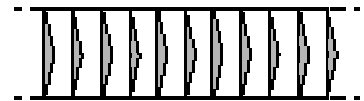


sen läpi [1: G2 s. 71, 72; G4 s. 34].

Tällaisia systeemejä ovat erityisesti kaikki koneet, joissa yksi vuorovaikutus siirtää energiaa koneeseen, toinen energiaa pois koneesta. Esimerkeiksi sopivat myös tasaisesti kulkeva ajoneuvo, tasaisesti toimiva lämmityslaitte, rannalla kärkevä auringonpalvoja jne.

Energiaa välittävä kone tai kappale voidaan liittää energiakaavioihin erillisenä laatikkona, jonka läpi energiaa esittävä osa kulkee [1: G2 s. 77; G6 s. 93; G7 s. 43, 55]. Käytännössä varsinaiseen energiansiirtoon kuuluu prosessien ketju, jota voidaan helposti havainnollista rakentamalla myös kaavioista vastaavia ketjuja [1: G2 s. 112; G7 s. 46]. Esitystavassa erityyppiset koneet rinnastuvat, samalla havainnollistuvat työn, lämmön ja sähköenergian merkitykset energian "siirtosuureina" sekä hyöty- ja hukkaenergian merkitys [1: G7 s. 103, 106, 121].

3d. *Eteneminen, leviäminen.* Aaltoliikkeessä energia etenee siirtymällä jatkuvasti aineen alkioilta toiselle aineen sisäisten vuorovaikutusten välityksellä.



Myös sähkömagneettisen aaltoliikkeen eteneminen voidaan ymmärtää ilmiöksi, jossa muuttuvien sähkö- ja magneettikentän vastakkaisten induktioilmiöiden dynamiikka siirtää energiaa. Hiukkassäteilyn ja aineessa johtuvan lämmön mukana kulkevat energiat kuuluvat tähän luokkaan.

Siirtyvään, välittyvään ja etenevään energiaan liittyy muuntumisilmiöitä aina sen mukaan millaisia energiaa siirtävät vuorovaikutukset ovat. Näihin mielikuviin kuuluva säilymisen hahmo, johtaa siirtyvän energiamäärän ja energiavirran tai -vuon mielikuviin ja johtaa tarpeeseen kuvata niitä määrällisillä "siirtosuureilla", joita ovat erityisesti työ, lämpö ja sähköenergia, sekä siirtymis- tai muuntumisnopeutta jne. esittävillä teho- ja intensiteettisuureilla.

Energian tuotto ja kuluminen

Energian säilymättömyys on myös ilmeinen näkökulma yleisen kielenkäytön mukaisissa mielikuvissa. Se on mukana yhtä hyvin energian tuottamista kuin sen kulumistakin koskevissa puhetoissa, jotka liittyvät esimerkiksi energiavarojen riittävyyteen, väsymiseen, uuden energian tarpeeseen. On kuitenkin helppo todeta, että tämä energian muuttumisen näkökulma kytkeytyy aina yksittäisiin energian lajeihin ja on tulkittavissa energian muuntumiseksi ja siirtymiseksi, joka ei riko säilymistä.

Energian käsitteen kvantitatiivisessa rakentamisessa se esiintyy juuri tällä tavalla. Rajatun ilmiöluokan energialajien puitteissa energia säilyy vain ideaalisessa tilanteessa, jota säilymisen empiirinen todentaminen ja siihen perustuva suureiden

määrittely tavoittelevat. Jokainen koe, jolla energian säilymistä havainnollistetaan, alkaa kuitenkin välttämättä toimenpiteellä, jossa systeemille annetaan energia "säilytettäväksi". Vastaavasti koetta riittävästi jatkettaessa tämä annettu energia kuluu.

Tästä syntyy tarve määritellä energian "siirtosuureita", joita erityisesti mekaniikassa edustaa työ [1: G2 s. 60, 65–66, 93, 104–107; G3 s. 66; G4 s. 29, 30, 35; G8 s. 37]. Kun kappale työnnetään liikkeelle, vuorovaikutus työntäjän kanssa siirtää sille energiaa työntäjältä: "voima tekee työtä (kappaleeseen)". Jarrutettaessa vuorovaikutus jarruttajan kanssa siirtää energiaa kappaleelta jarruttajalle, "kappale tekee työtä voimaa vastaan".

Kahden eri käsitteen, "voiman tekemän työn" ja "voimaa vastaan tehdyn työn", käyttöä on moitittu. Hahmottavassa lähestymistavassa kuitenkin seurataan luonnollista käsitteenmuodostusta ja pyritään ensin puhumaan ilmiöistä luonnollisella tavalla. Ihmismieli hahmottaa ominaisuudet aina "positiivisina". Myös vastakkaiset ominaisuudet, kuten kuuma ja kylmä tai vasen ja oikea, ovat molemmat positiivisia ilmauksia. Siksi kieli on täynnä vastakohtapareja.

Teoreetikko voi sanoa kahdesta vastakohtia tarkoittavasta käsitteestä aina toista tarpeettomaksi, koska se voidaan korvata negatiivisella toisella. Mutta luonnollisessa kielessä kylmä ei ole negatiivista kuumaa, eikä oikea ole negatiivinen vasen jne. Negatiiviset suureet, kuten negatiiviset luvutkin, ovat abstraktioita. Teoreettisessa lähestymistavassa, jossa energiaperiaate johdetaan dynamiikan peruslakia integroimalla, saadaan heti "voiman tekemä työ", joka voi olla positiivinen tai negatiivinen. Mutta energian siirtymisestä ja muuntumisesta erilaisissa ilmiöissä on havainnollisempaa puhua positiivisin käsittein, jotka suoraan ilmaisevat miten energia siirtyy. On monimutkaista ja abstraktia selittää, että liikettä vastustava voima tekee negatiivista työtä, jolloin kappale saa negatiivisen energianlisäyksen. Tällainen puhe on algebraa eikä ilmiön kuvaamista.

Energian kulumisesta siirrytään takaisin energian säilymiseen yhdistämällä energian lajeja kattokäsitteiksi. Mutta saadun yleisemmänkin energian yleisempi säilymislaki on omien ideaalisuusvaatimustensa alainen ja siihen liittyy omat kulumisilmiönsä. Siten energian käsitteen yleistyminen on oikeastaan vuorotteleva ketju:

säilyy – ei säilykään – yleistyy / säilyy – ei säilykään – yleistyy / säilyy – ...

Energian yleisen säilymislain toteamisenkin jälkeen (Helmholtz, 1848) fysiikassa on esiintynyt useita tilanteita, joissa energian säilyminen on asetettu kyseenalaiseksi. Niitä ovat olleet esimerkiksi radioaktiivisuus ja tähtien energiansaannin pohdinta, jotka molemmat palautuivat säilymislain alaisiksi, kun ydinvuorovaikutusten energia liitettiin lajien perheeseen. Sittenkin beetahajoaminen johti samanlaiseen pohdintaan, joka päättyi tunnetulla tavalla uuden hiukkaslajin, neutriinin, siis jälleen uudenlaisen energiankuljettajan löytymiseen. Tämän hetkinen säilymättömyyden problematiikka liittyy ehkä lähinnä mustien ja valkoisten aukkojen pohdintaan mahdollisina aitoina energian nieluina ja lähteinä.

Energian säilyminen näyttää olevan niitä harvoja asioita, jotka fysiikasta tarttuvat kaikkien oppilaiden tajuntaan. Fysiikan valintakokeen mekaniikan tehtävässä oli kerran varomattomasti kysytty, kuinka paljon energiaa törmäyksessä kuluu. Yhteen koepaperiin oli ilmeisen kiivaassa mielentilassa kirjoitettu vastaukseksi kis-sankokoisin kirjaimin "ENERGIA SÄILYY"!

Hyvin opitut valmiit tuotteet peittävät näkyvistä fysiikan perusluonteen jatkuvasti kehittyvänä luonnonilmiöiden esityksenä.

Kirjallisuusviitteet²

- [1] Hakulinen, H., Lavonen, J. & Kurki-Suonio, K. *Galilei 2–8*. Weilin+Göös/WSOY. 1994–1996
- [2] Karvonen, P. *Oppikirjateksti toimintana*. Väitöskirja. Suomalaisen kirjallisuuden seura. Helsinki 1995
- [3] Kervinen M., Korpela R. & Kurki-Suonio, K. *Kvantti 3b*. WEILIN+GÖÖS, 1985
- [4] Kurki-Suonio, K. *Neljä keskipakovoimaa*. Dimensio **60** 1/96. 14–20.
- [5] Kurki-Suonio, K. & Kurki-Suonio, R. *Fysiikan merkitykset ja rakenteet*. Limes ry., Helsinki, 1994
- [6] Kurki-Suonio, K. & Kurki-Suonio, R. *Aaltoliikkeestä dualismiin*. Limes ry., Helsinki, 2. painos 1994
- [7] Kurki-Suonio, K. & Kurki-Suonio, R. *Vuorovaikuttavat kappaleet – mekaniikan perusteet*. Limes ry., Helsinki, 3. painos 1995
- [8] Kurki-Suonio, K. & Kurki-Suonio, R., Lavonen, J. & Hakulinen, H. *Galilei 1. Opettajan opas*. Weilin+Göös/WSOY, 1994
- [9] Waks, S. *Science–technology dimensions in physics education: prospects and impact*. *Phys. Educ.* **29**, 64–70 (1994)

² Julkaistussa tekstissä kirjallisuusviitteiden luettelo on virheellinen.