

Kolme luentoa käsitteenmuodostuksesta

Kaarle Kurki-Suonio, prof. emer.
Fysikaalisten tieteiden laitos, Helsingin yliopisto

Luentojeni ensimmäinen otsikko "*merkitykset*" on pääotsikko, kaksi muuta, "*kvantifiointi*" ja "*hierarkiat*" ovat kaksi siihen keskeisesti kuuluvaa spesifistä teemaa. Olen puhunut fysiikan käsitteiden merkityksistä kauan, ainakin neljännesvuosisadan¹. Ne, jotka ovat kuulleet opetustani, tunnistavat näissä luennoissa varmasti samoja ajatuksia. Toivon kuitenkin, että he huomaavat myös jotakin kehitystä tapahtuneen.

JOHDANTO. TIEDON INTUITIIVINEN PERUSTA

Ajatellaan, että *ihminen kysyy ja tiede vastaa*. Haluamme tietää totuuden siitä, miten asiat ovat, mitä ovat aine, sähkö, painovoima tai elämä, tajunta, kuolema jne., mikä on niiden "perimmäinen olemus", tarkoitus tai merkitys, ja vaadimme, että tiede vastaa. Kun jotakin on "*tieteellisesti todistettu*", se on "*objektiivinen totuus*" eikä siihen ole sanomista.

Sitten kuitenkin sanotaan – niin kuin olen lukenut erään oppikirjan sähköopin alusta, – "*Kukaan ei tiedä, mitä sähkö on*". Kun näin sanotaan jostakin, joka on tieteellisesti parhaiten tunnettuja asioita, sanotaan oikeastaan, ettei *kukaan tiedä mitään, eikä kukaan voikaan tietää mitään*. Tässä ollaan kyllä oikeassa, vaikkei se ehkä olekaan kovin motivoiva alku opetukselle, sillä *empiirisessä tieteessä itseisarvoisia totuuksia ei ole*. Itseisarvoista, nk. *apriorista* totuutta voivat edustaa enintään *matematiikan ja logiikan* deduktiivisista rakenteista seuraavat tulokset, jotka ovat muotoa, "*jos A niin B*".

Lopullisten vastausten, ehdottoman varman tiedon kysymiseen sisältyy objektiivisuuden vaatimus. *Objektiivisuus on hyvä tavoite*, suunta, johon pitää pyrkiä, mutta sen saavuttaminen on *mahdotonta*. Olemme kuitenkin varsin vakuuttuneita siitä, että *tieteen valtava edistyminen on historiallinen tosiasia*. "*Tutkimalla saa selville*" on ollut omankin opetukseni toinen tunnuslause! On "saatu selville" jotakin, jota pidämme *varmana* tieteellisenä tietona ja *opettamisen arvoisena*.

Näiden luentojeni aihe on keskellä tätä tietämisen ongelmaa. Käsitteenmuodostus on tieteen filosofian ydinkysymyksiä. Se kytkee yhteen *ontologian* ja *epistemologian*, eli kysymykset, "*mitä on*" ja "*mitä siitä voidaan tietää*". Fysiikassa tieto ja ymmärtäminen merkitsevät ensi sijassa luonnon käsitteellistä hallintaa, joka perustuu käsitteiden ja käsiterakenteiden merkityksiin. Käsitteenmuodostus eli merkitysten syntyminen, käsitteistäminen, rakenteistuminen ja yleistyminen, on siten fysiikanopetuksen tärkeä kysymys. Se on myös tieteen historian keskeinen kysymys, sillä merkitysten ja niihin perustuvien käsitteiden asteittainen rakentuminen on historiassa toteutunut kehityskulku. Samalla se yhdistää tieteen historian opetukseen, sillä historiassa toteutuneen merkitysten rakentumisen tulisi voida toteutua oppimisessa.

Käsitteenmuodostuksen perusongelmana on havainnon ja mielikuvien tai empirian ja teorian suhde, joka johtaa syvälle subjektiivisuuden ja objektiivisuuden tai intuition ja logiikan suhteen päättymättömiin kysymyksiin. Olemme näin ollen mitä kiehtovimmassa aiheessa. Vain ratkeamattomat ongelmat voivat olla aidosti kiinnostavia. Ratkaisu trivialisoi ongelman.

Tässä ovat vastakkain *tiede ja intuitio*. Intuitio on ehdottomaan totuuteen pyrkivälle tieteelle kauhistus. "*Metafysiikka ulos!*" oli 1900-luvun alkupuolen positivistisen fysiikan sotahuuto. Vain empiirisesti vahvistettu tieto kelpaa. Intuitiiviset mielikuvat ja niihin liittyvät sanonnat, kuten "voima vaikuttaa" ja atomit, joiden olemassaolosta ei silloin ollut suoraa havaintonäyttöä, olivat tieteessä luvatonta metafysiikkaa. *Ihmisen kysymykset ovat* kuitenkin *intuitiivisia*. Tiede kyllä pyrkii vastaamaan "niin hyvin kuin se osaa", sen perusteella, mitä on mahdollista "saada tutkimalla selville". Mutta tutkimalla voidaan edes yrittää vastata vain *operationaaliin kysymyksiin* eli kysymyksiin, joita voidaan "kysyä luonnolta". Tällainen kysyminen merkitsee sellaisen operaation toteuttamista, joka pakottaa luonnon vastaamaan.

Tutkimusta varten tieteen on siis operationalisoitava ihmisen kysymykset. Operationalisointi on *reduktio*, pelkistys. Mutta kun kysymys on redusoitu, on sen merkityskin redusoitu. Ja redusoituun kysymykseen

¹ Ks. esimerkiksi Kaarle ja Riitta Kurki-Suonio: *Fysiikan merkitykset ja rakenteet*. Limes ry., Helsinki, 1994.

saadaan redusoitu vastaus. Tieteen vastaukset eivät siten olekaan vastauksia ihmisen kysymyksiin vaan tieteen omiin kysymyksiin, redusoituja vastauksia redusoituihin kysymyksiin, jolloin sekä kysymyksistä että vastauksista on redusoitunut pois tarkoitettu syvin intuitiivinen merkitys. Intuitiivisiin kysymyksiin voi olla vain intuitiivisia vastauksia.

Intuition eliminointi tieteestä on mahdotonta. Tiedettä ei ole ilman intuitiota. Jokaisen redusoidun kysymyksen takana on intuitiivinen peruskysymys ja sen intuitiivinen operationalisointi. Etsitään operaatiota, jonka toteuttaminen vastaisi intuitiivisesti arvioiden mahdollisimman hyvin alkuperäisen kysymyksen merkitystä. Ja operaation tuloksena saatu redusoitu vastaus vaatii intuitiivisen tulkinnan. "Luonnolta saatujen" vastausten merkitystä on voitava tulkita intuitiivisesti alkuperäisen kysymyksen intuitiivisen merkityksen kannalta.

Itse operationaalisuuskin on vain näennäisesti objektiivista, sillä operaatiot, tutkimukset, joilla luonnolta voidaan kysyä, perustuvat mielikuviimme luonnosta. Mielikuvat ovat intuitiivisia. Ja luonnolta saadut vastaukset ovat havaintoja, jotka myös ovat sidotut mielikuviimme. Tätä filosofi tarkoittaa puhuessaan *havainnon teoriapitoisuudesta*, sillä mitä muuta teoria on kuin täsmennettyjä mielikuvia. Mutta, kun toisaalta kuitenkin kaikki käsitteenmuodostus perustuu operationaalisuutta tavoittelevissa kokeissa saatuihin havaintoihin, on yhtä perusteltua puhua *teorian havaintopitoisuudesta*. Tällä tavalla objektiivisuuden tavoitekin piiloutuu syvälle operationaalisuuden idean sisään, tähän havaintojen ja mielikuvien eli empirian ja teorian erottamattomaan dualismiin.

Tieteen ainoa mahdollinen pakotie on "*intersubjektiivisuus*". Kun objektiivisia totuuksia ei tutkimalla saavuteta, totuuksista sovitaan. Tieteen vastauksia, tieteellistä tietoa, tieteellisiä tulkintoja, tieteellisiä kokeita ja havaintoja, on kaikki se, mitä yhteisesti voidaan pitää tieteellisenä. Intersubjektiivisen yhteisymmärryksen vaatimus koskee tällöin kaikkea, intuitiivisten kysymysten merkitystä, niiden operationalisointia, operationaalisen tutkimuksen toteutusta, siinä saatuja havaintoja, niiden käsitteistämistä ja intuitiivista tulkintaa alkuperäisen kysymyksen valossa. Vasta tämän jälkeen meillä on *tieteellinen käsite*, jonka ytimenä on *yhteisesti ymmärretty empirinen merkitys*. Mutta sen merkityksen ja varmuusasteen ymmärtämiseksi on välttämätöntä tiedostaa intuition keskeinen asema tässä prosessissa.

"Tiedeyhteisön" toiminnan ja tieteen historian tarkastelu vakuuttaa helposti siitä, että myös objektiivisuutta lievempi intersubjektiivisuuden vaatimus on melko toivoton tavoite. Kuitenkin meillä on jotakin, jota pidämme riittävästi perusteltuna, jopa varmana, tietämisen ja opettamisen arvoisena. Tieteen saavutukset, yleisemmin koko inhimillinen kulttuuri, yhteinen kieli, kielten käännettävyys jne. suorastaan pakottaa ajattelemaan, että taustalla vaikuttaa jokin tekijä, "*intersubjektiivinen intuitio*", joka ohjaa ihmisiä eri aikoina ja eri puolilla maailmaa olennaisissa suhteissa samanlaiseen merkitysten tajuamiseen. Tunneimme tieteen ja yleisemminkin kulttuurin historiasta sen merkillisen piirteen, että samat ideat ja oivallukset, samanlaiset virtaukset näyttävät heräävän samanaikaisesti eri puolilla, "kun aika on kypsä."

Mikä voisi olla "intersubjektiivisen intuition" luonne ja alkuperä? Voimmeko ehkä puhua jopa ihmisten yhteisestä sosiaalisesta tietoisuudesta? Onko se kaikille kuuluvaa myötäsyttyistä lajiominaista ihmisyyttä, vai onko se jotakin yleisempää, tietoisuutemme intuitiivista yhteyttä tavoittamattomaan "verhontakaiseen todellisuuteen" ja heijastusta tämän todellisuuden aidosta luonteesta, josta yksilöt ehkä voivat päästä osalliseksi vain vähitellen ja asteittain omien ponnistelujensa kautta? Miksi sitten näyttää usein jopa siltä, että tiede todellisuutta etsiessään joutuu "*etenemään vastavirtaan*", ihmisten ponnistellessa kaikin voimin kehityksen estämiseksi? Muistammehan Planckin masentuneen huokauksen: "*Uusi idea tulee hyväksytyksi vain siten, että vanha sukupovi kuolee.*"

Olisi houkuttelevaa jatkaa tätä ajatusta, pohtia sen merkitystä ja implikaatioita. Merkitseekö se mahdollisesti, että empiiristen merkitysten hahmotukseen perustuvilla tieteellisillä käsitteillä ei itse asiassa olekaan vaihtoehtoja? Tämä johtaisi meidät kuitenkin yhä kauemmas luentojeni varsinaisesta aiheesta.

1. KÄSITTEIDEN EMPIIRISET JA MATEMAATTISET MERKITYKSET

1.1 Empiiriset merkitykset

Näiden ajatusten alku on kaukana omassa opiskeluajassani. Olen työstänyt niitä mielessäni läpi koko akateemisen urani kohdatessani yhä uudelleen kaksi erilaista näkemystä kaavojen roolista².

1. Useimmat tuntuivat pitävän kaavoja pääasiassa laskennallisen työskentelyn lähtökohtina, työohjeina ja välineinä. Kaavan ymmärtäminen merkitsi silloin sen tietämistä, miten sitä käytetään laskemiseen. Opiskelu painottui tällöin laskennallisten ongelmien ratkaisemisen harjoitteluun ja laskutaidon kehittämiseen.

2. Itse opin pitämään kaavoja ensisijaisesti empiiristen merkitysten esityksinä. Niiden ymmärtämiseksi oli tärkeintä selvittää, miten ne muodostetaan empiirisistä merkityksistä käsin.

Differentiaali- ja integraalilaskenta tuotti minulle, lukion lyhyen matematiikan opiskelleelle, aluksi suuria vaikeuksia. Muistan yhä ensimmäisenä kevätlukukautena kokemani oivalluksen, kun minulle avautui se suunnaton vapaus, minkä matematiikka tarjosi mitä moninaisimpien empiiristen merkitysten esittämiseen. On merkillepantavaa, että oivallus syntyi nimenomaan matematiikan yhteydessä. Se kantoi minua läpi opiskelun ja koko akateemisen urani sekä tutkijana että opettajana. Siitä kiteytyi sittemmin myös opetukseni filosofinen lähtökohta "*Merkitykset ovat ensin*", jonka monet tietävät nimenomaan fysiikan oppimista luonnehtivaksi tunnuslausekseni ja opetuksen *hahmottavan lähestymistavan* kantavaksi periaatteeksi. Sen mukaan opetuksen punaisena lankana tulisi olla *havaintoihin nojautuva, systemaattisesti etenevä empiiristen merkitysten luominen ja käsitteistäminen*.

Avainsana on "*merkitykset*". Johdannon tarkoitus oli korostaa sitä, että merkitykset ovat intuitiivisia. Ne syntyvät hahmottamalla. Tämä tarkoittaa, että ne syntyvät havaintojen ja mielikuvien yhteisvaikutuksesta, jossa empiirisiä ja teoreettisia elementtejä ei voida erottaa. *Hahmotus* on samalla kertaa sekä mielikuviin nojautuvaa ja niitä hyödyntävää havaitsemista että mielikuvien muodostamista ja rakentamista havaintojen perusteella. *Siinä toteutuvat sekä havaintojen teoriapitoisuus että teorian havaintopitoisuus*.

Näin muodostuvat mielikuvat ovat *empiirisiä merkityksiä*, tunnistettuja hahmoja. Tässä mielessä merkitykset syntyvät ensin. *Käsitteistäminen* merkitsee niiden nimeämistä. Se rakentaa kieltä ja terminologiaa, joka tekee mahdolliseksi keskustelun havainnoista ja niiden tulkinnoista, "neuvottelun merkityksistä" tieteellisyyden vaatiman intersubjektiviisuuden tavoittamiseksi. Merkitysten hahmotus ja käsitteistäminen ovat näin alistetut *sosiaaliselle prosessille*.

Merkitysten hahmottumista hallitsee ihmismielen sidonnaisuus paikkaan ja aikaan. Hahmotamme ympäristöämme *paikassa ja ajassa*. Tämä määrää suurelta osin koko sen mielikuvarakenteen, jonka mukaan hahmotamme ympäröivää ilmiömaailmaa. Siitä seuraa havaintojemme luonnollinen ontologinen tulkinta: todellisuus muodostuu *olioista*, jotka ovat olemassa jossakin avaruuden paikassa jonakin aikana, ja *ilmiöistä*, jotka ovat tapahtumista ajassa, sitä, mitä olioille tapahtuu, mitä ne tekevät ja miten ne käyttäytyvät.

Olioiden ja ilmiöiden tunnistus perustuu niiden *ominaisuuksiin*. Olioilla on pysyviä tunnistusominaisuuksia, jotka tekevät mahdolliseksi niiden identifioinnin, ja ilmiöissä muuttuvia ominaisuuksia. Ilmiöt taas tunnistetaan ominaisuuksien muuttumisen luonteen perusteella. Olioiden muuttuvien ja pysyvien ominaisuuksien väliset korrelaatiot koetaan niiden *riippuvuuksiksi*. Riippuvuudet merkitsevät lainmukaisuutta – ilmiöt tapahtuvat omien lakiansa mukaisesti. Ilmiöiden lait ovat niiden tunnistusominaisuuksia.

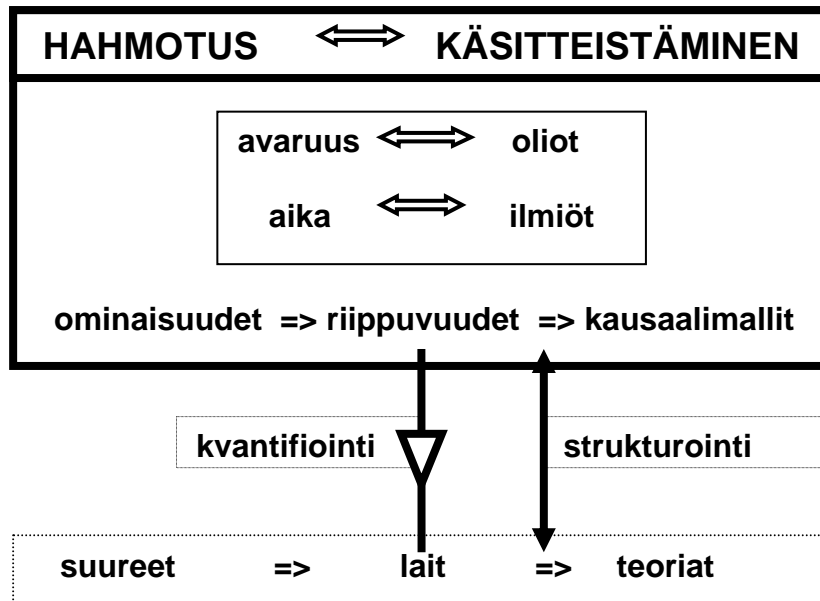
Lainmukaisuuden mielikuvaan kuuluu *vaikuttamisen* hahmo. Ilmiöiden lakien ymmärretään kuvastavan olioiden vaikutuksia toisiinsa. Mutta olion vaikuttamisessa toiseen on kyseessä *syysuhde*, on vaikuttaja ja vaikutuksen kohde. Ilmiöistä tulee vaikutustapoja. Päädyimme mentaalisiin *kausaalimalleihin*, jolloin koemme ymmärtävämmä ilmiöt. Tämä on lähellä sitä, mitä Planck sanoi: "*ymmärrämme ilmiön, kun meillä on sille mekaaninen malli*".

Näin rakentuva käsitteellinen "*ymmärtäminen*" perustuu siihen intuitiiviseen ontologiseen vakaumukseen, että *havainnot ja niitä esittämään luodut käsitteet edustavat aidosti luonnon olioita ja ilmiöitä, näiden ominaisuuksia, ominaisuuksien välisiä riippuvuuksia ja ilmiöiden syyssuhteita, sellaisina kuin ne ovat ja tapahtuvat avaruudessa ja ajassa*.³

² Vrt. K. Kurki-Suonio: *Kaavatauti - oireet, hoito ja ehkäisy*. Matemaattisten Aineiden Aikakauskirja **44**, 1980.

³ K. Kurki-Suonio: *Modernin fysiikan perushahmojen synty*. Dimensio **64**, 2 ja 3/2000.

Hahmotus ja sitä seuraava käsitteistäminen merkitsevät siten todellisuuden mallintamista käsitteillä ja käsiterakenteilla, joiden ytimenä on niiden empiirinen merkitys.



Kuva 1.1 Empiiristen merkitysten luonti

Tällainen on se hahmotusperusta, josta fysiikka alkaa, eräänlainen "esiymmärrys", jota realisoidaan ja täsmennetään, kun maailmaa hahmotetaan ja käsitteistetään. Huomio, että kaikkien kielten rakenteeseen kuuluu substantiiveja, verbejä ja adjektiiveja, joiden avulla voidaan yhteisesti puhua olioista, ilmiöistä ja ominaisuuksista, tukee sellaista ajatusta, että tämä on pitkälti ihmiselle ominainen, *intersubjektiveisen intuition* ydin.

Tämän todellisuutta kuvaavan mielikuvarakenteen tiedostaminen intuitiiviseksi merkitsee – niin varmana ja itsestään selvänä kuin sitä pidämmekin –, että tieteen kannalta kaikkia sen elementtejä erikseen on pidettävä *työhypoteeseina*, jotka voidaan myös kyseenalaistaa. Fysiikan edistyessä niitä on myös kyseenalaistettu yhtä kerrallaan. Modernin fysiikan ymmärtämisen vaikeuden voidaan ymmärtää johtuvan siitä, että suhteellisuusteoria ja kvanttimekaniikka perustuvat juuri tällaisiin kyseenalaistuksiin, jotka ovat ristiriidassa tämän intersubjektiveisen "esiymmärryksen" kanssa, mutta jotka ovat empirian pakosta osoittautuneet oikeutetuiksi. *Empiirinen pakko* merkitsee, että luonto on vastannut operationaalisiiin kysymyksiimme tavalla, jota emme ole osanneet odottaa, mutta tieteen sitoutuminen objektiivisuuden tavoitteeseen on pakottanut meidät hyväksymään vastauksen ja ottamaan sen huomioon.

1.2 Kvantifiointi

Aika, avaruus, oliot, ilmiöt, ominaisuudet jne. ovat kvalitatiivisia käsitteitä, havaintojemme intuitiivisia ontologisia tulkintoja, joiden avulla ymmärrämme ilmiöitä. *Ymmärtämisen perusta on kvalitatiivinen*. Näistä kvalitatiivisen ymmärryksen ontologisista elementeistä ominaisuudet ovat se "heikoin lenkki", joka tekee mahdolliseksi käsitteiden operationalisoinnin. Standardi toteaa tämän lakonisesti, aivan kuin itsestäänselvytenä: *Suure on ominaisuus, joka voidaan laadultaan tunnistaa ja määrältään mitata. Suureet ovat (olioiden tai ilmiöiden) mitattavia ominaisuuksia.*

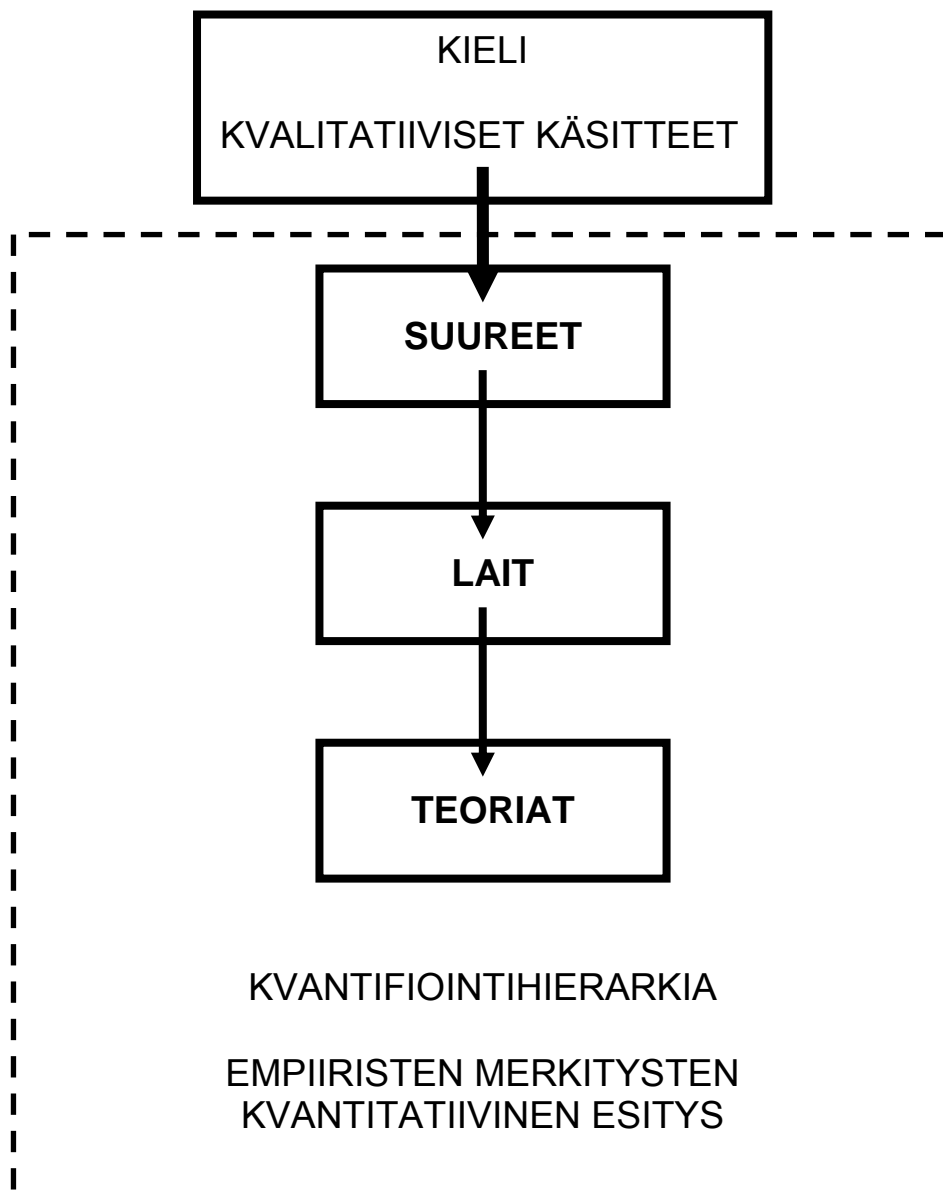
Tähän kätkeytyy kuitenkin fysiikan ymmärtämisen koko perusta. Siirtyminen laadullisesta tunnistamisesta määrälliseen mittaamiseen merkitsee kvantifiointia, kvalitatiivisen käsitteistön muuntamista kvantitatiiviseksi. Suureet ovat siinä avainasemassa. Sekä teoreettiset että kokeelliset tarkastelut ja tutkimukset koskevat aina suureita. Niitä on mahdotonta välttää, eikä ymmärtämisestä ole oikeutettua puhua, ellei tiedä, minkä olioiden tai ilmiöiden mitä ominaisuuksia on käsittelemässä. *Kvantifiointi on kynnysoperaatio, jonka ytimenä on ominaisuuksien hahmotettujen merkitysten välittyminen suureille*. Palaan siihen tarkemmin luentojeni toisessa jaksossa. Keskityn tässä lyhyesti siihen, mikä tämän luennon aiheen kannalta on tärkeää.

Kun ominaisuudet muuntuvat suureiksi, ne saavat yksikön ja lukuarvon. Niistä tulee laskennallisia elementtejä. Samalla ominaisuuksien välisistä riippuvuuksista tulee suureiden noudattamia lakeja, jotka

voidaan ilmaista matemaattisessa muodossa, ja mentaalisisistä kausaalimalleista tulee teorioita ja teoreettisia malleja, matemaattisia rakenteita.

Tässä prosessissa *empiiriset merkitykset säilyvät!* Kvantifiointi siirtää kvalitatiivisten käsitteiden ontologisiksi miellettyt empiiriset merkitykset sellaisinaan vastaaville kvantitatiivisille käsitteille. *Kvantifiointi ei luo uusia merkityksiä*, se vain täsmentää jo ymmärrettyjä empiirisiä merkityksiä. Intuitiivinen ontologinen vakaumuksemme pysyy. Suureet, lait ja teorit mielletään – samalla tavalla kuin edeltävät kvalitatiiviset vastineet – todellisten olioiden ja ilmiöiden todellisten ominaisuuksien ja todellisten kausaalisuhteiden esityksiksi, jolle vain on saatu kvantifioinnin avulla täsmällinen muoto.

Kvantifiointi on fysiikan perusoperationalisointi, portti, jonka avaa ominaisuuksien muuntaminen suureiksi. Ei niin, etteivät kvalitatiivisetkin kokeet olisi operationaalisia ja tarjoaisi luonnon vastauksia, mutta kvalitatiivisten havaintojen vaihtuminen kvantitatiivisten kokeiden täsmällisiin toistettaviin mittaustuloksiin nostaa tulosten luotettavuuden uudelle tasolle, jolla myös niiden merkityksestä on helpompi päästä yhteisymmärrykseen.



Kuva 1.2 Kvantitatiivisten käsitteiden kolmitasoinen hierarkia

Näin syntyvässä käsiterakenteessa fysiikan kvantitatiiviset käsitteet, suureet – lait – teorit, muodostavat selvän *kolmitasoisen hierarkkisen järjestelmän*, sillä suureet ovat lakien ja lait teorioiden elementtejä. Lait ovat suureiden relaatioita ja teorit tiettyjen peruslakien virittämiä rakenteellisia kokonaisuuksia.

Jokaisen ominaisuuden kvantifiointi suureeksi on oma ongelmansa. Siihen tarvitaan *kvantifioiva koe*, jossa voidaan verrata kahden olion tai ilmiön saman ominaisuuden asteita niin, että voidaan todeta intuitiivisesti ilmeisin perustein esimerkiksi niiden yhtäsuuruus tai toisen kaksinkertaisuus. Mutta kvantifioiva koe on väistämättä itsessään kvantitatiivinen koe, jossa jotakin on mitattava. Se edellyttää siis jonkin tai joidenkin primaarimpien suureiden tuntemista ja siis aiempia kvantifiointeja. Näin kutoutuu "lokaalisti suunnattu" suureiden verkko, jonka jokainen solmupiste edustaa yhtä kvantifiointia. Tämä johtaa ilmeiseen ensimmäisen kvantifioinnin ja ensimmäisen suureen ongelmaan, jonka ratkaisu vie suoraan tämän luennon otsikkoon.

1.3 Matemaattiset merkitykset

Suureiden verkko alkaa lukumäärän käsitteestä. *Lukumäärä* on ensimmäinen suure, fysiikan kaiken kvantitatiivisen käsittelyn kantasuure. Suure se on, koska se esittää empiirisesti havaittavaa ominaisuutta, tunnistettavien yksilöllisten olioiden (sormien, lampaiden, omenoiden, kolikoiden) muodostaman joukon suuruutta. *Luonnolliset luvut* ovat tämän suureen mahdolliset arvot. Lukumäärän *additiivisuus* hahmottuu tällaisten joukkojen yhdistämistä hallitsevana *empiirisenä lakina*, joten sitä voidaan perustellusti pitää myös yhteen- ja vähennyslaskun ja niitä koskevien matemaattisten lakien lähteenä⁴.

Tällä tavalla matemaattisten käsitteiden voidaan nähdä sikiävän empiirisistä merkityksistä. Matematiikan "*luonnolliset luvut*" syntyvät suureen "*lukumäärä*" esityksenä ja yhteen- ja vähennyslasku tämän suureen empiirisistä laeista. Näinhän matematiikan opetus lapsille tavallisesti alkaakin: yhteen- ja vähennyslasku opitaan hahmottamalla jokapäiväisen ympäristön esinejoukkojen ominaisuuksia. Kvantifiointi synnyttää kvantitatiivisen fysiikan. Samalla se merkitsee myös matematiikan alkua. *Matematiikka syntyy yhdessä kvantitatiivisen fysiikan kanssa empiiristen merkitysten rakenteesta*.

Varsinaisen "puhtaan" matematiikan ideana on kunnianhimoinen pyrkimys "vapauttaa" merkitysten rakenne *empiirisestä painolastista*. Tällöin suureet redusoiduivat matemaattisiksi alkioiksi ja lait alkioiden rakenteelliseksi relaatioiksi. Kun alkiolta on riisuttu niiden intuitiiviset empiiriset merkitykset, jäljelle jäävät vain niiden "matemaattiset merkitykset", puhtaat rakenteelliset merkitykset. Alkiolla ei enää ole mitään itseisarvoista merkitystä, vaan sen merkityksen luovat ja määrittelevät pelkästään sen rakenteelliset relaatiot muihin alkioihin, relaatiot, jotka ovat matemaattisten operaatioiden matemaattisten lakien alaisia. (Tämä voidaan rinnastaa siihen, miten ihmisten yksilöllinen merkitys muodostuu hänen vuorovaikutustensa verkostosta. Sama koskee yleisemminkin luonnon olioiden "olemusta". Esimerkiksi elektroni on elektroni vain juuri vuorovaikutustensa takia. Vuorovaikutuksistaan riisuttu "*alaston elektroni*" on kuvitelmanakin mahdoton.)

Käsitteiden matemaattiset merkitykset ovat empiirisistä merkityksistä eristettyjä rakenteellisia merkityksiä.

Puhtaasta matematiikasta tulee pelkistettyä käsiterakenteiden tutkimusta, jossa "kaavat" todellakin ovat merkitysten lähtökohta ja perusta. Fysiikassa sen sijaan empiria luo merkitykset.

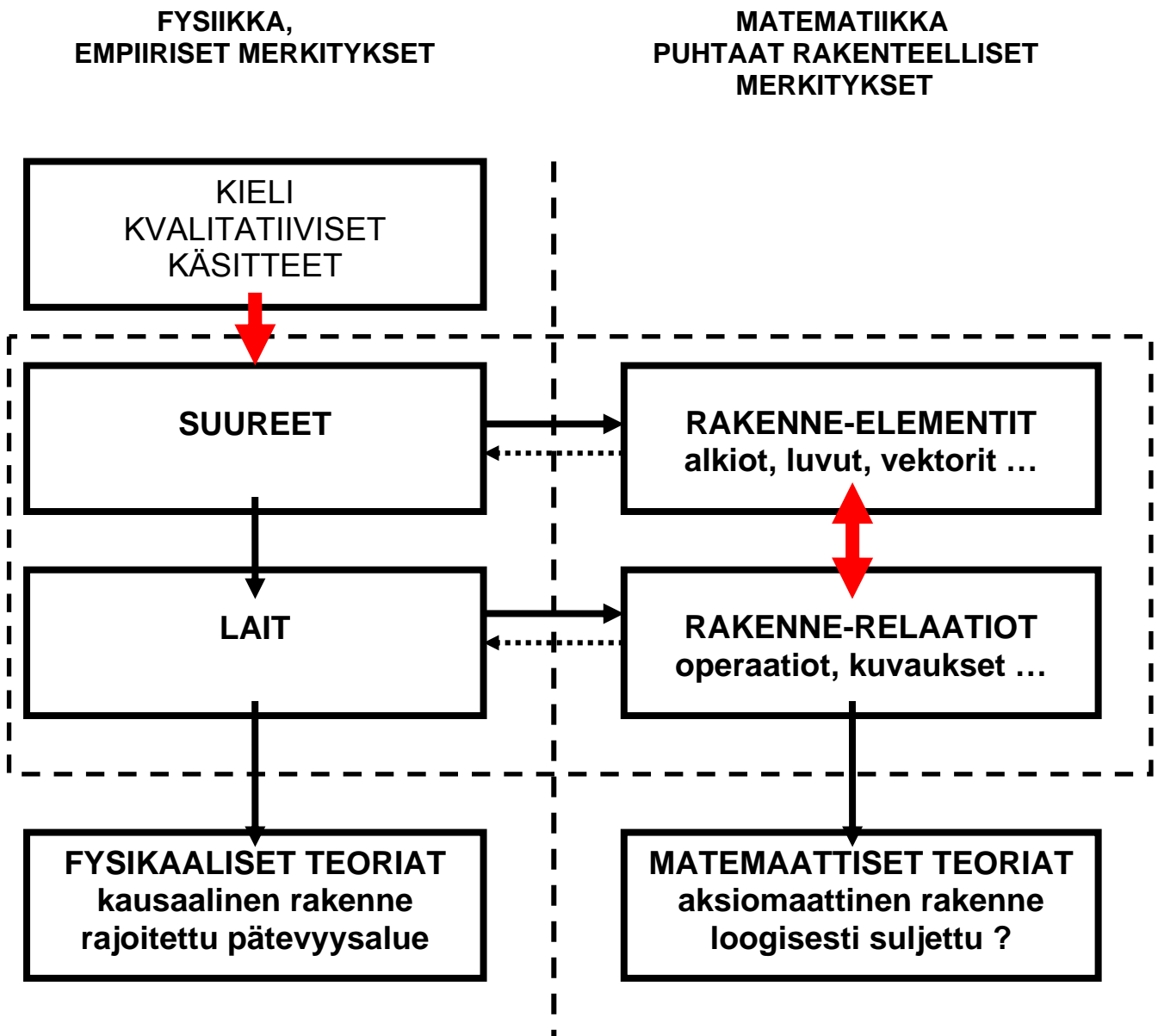
Alkioiden yksilöllinen intuitiivinen merkitys ominaisuuksina eliminoituu. Relaatioilla, jotka luovat niiden matemaattiset merkitykset, ja näitä hallitsevilla matemaattisilla operaatioilla on kuitenkin intuitiivinen alkuperä ominaisuuksien välisissä riippuvuuksissa, jotka ovat empiiristen merkitysten rakennetta.

Eteneminen fysiikan polulla perustuu empiiristen merkitysten hahmotukseen. Siellä edetään yhä uusille ilmiöalueille, joilla tunnistettavien olioiden ja ilmiöiden ominaisuuksista ja riippuvuuksista hahmottuu uusia empiirisiä merkityksiä ja uusia suureita ja lakeja. Lakien induktiiviset yleistyksset, jotka tulevat mahdollisiksi nimenomaan matemaattisen esityksen ja matemaattisten merkitysten hyödyntämisen kautta, johtavat käsitteistön yleistymiseen. Tämä merkitsee *empiiristen merkitysten yleistymistä* uusille alueille. Samalla *empiiristen merkitysten rakenteellisuus* kasvaa tässä kehityksessä. Tähän perustuu fysiikan *hierarkkisesti etenevä yhdentymiskehitys*, jossa ymmärrys syvenee asteittain ilmiöiden hahmottuessa yleisempien ilmiöiden erilaisiksi toteutumiksi, niin kuin esimerkiksi staattinen sähkö, magnetismi, sähkövirta, induktio ja valo ymmärretään samojen Maxwellin lakien alaisiksi sähkömagnetismin ilmentymiksi. Käsitteistön hierarkkisen rakenteen kehityksen mukana hahmotusprosessi itsekin rakenteistuu asteittain niin, että siinä alkaa yhä selvemmin erottua teoreettisesti ja kokeellisesti painottuvia osaprosesseja. Helposti syntyy jopa harhakuva erillisistä teoreettisesta ja kokeellisesta fysiikasta.

Lukumäärä voidaan ymmärtää portiksi, joka johtaa empiirisistä merkityksistä *matematiikan polulle*. Siellä eteneminen nojautuu rakenteellisiin merkityksiin, niiden induktiivisiin yleistyksiin ja loogiseen päättelyyn. Lukumäärästä saadaan matemaattisiksi alkioiksi vain luonnolliset luvut. Laskutoimitusten lait tarjoavat puhtaasti matemaattisen mahdollisuuden *uusien alkioiden* luomiseen ja *uusien operaatioiden* käyttöönottoon. Mitään empiiristä hahmotusta ei tarvita, koska empiiriset merkitykset on eliminoitu heti portilla. Tällä polulla loogisen

⁴ Vrt. G. H. Hardy: *Matematiikon apologia*. suom. Kimmo Pietiläinen. Terra Cognita (1997), luku 16.

päätelyn taidot kehittyvät. Luonnollisista luvuista ja yhteen- ja vähennyslaskun laeista saa näin alkunsa *hierarkkisesti etenevä lukukäsitteen yleistysten ja uusien laskutoimitusten ketju tai verkko*, jonka alkuvaiheisiin kuuluvat negatiiviset luvut, kerto- ja jakolasku, murtoluvut ja desimaaliluvut sekä edelleen potenssit, juurenotto, logaritmit jne., kunnes rakenne sulkeutuu. Matemaattisten käsitteiden hierarkiassa on nousu uudelle tasolle, *teorian tasolle*.



Kuva 1.3 Fysiikan ja matematiikan käsitestruktuurien vertailu.

Näin tarkasteltuna matematiikan käsitestruktuuri rinnastuu fysiikan kvantitatiivisten käsitteiden kolmitasoiseen hierarkkiseen rakenteeseen. Vertailussa korostuvat niiden olennaiset erot, jotka seuraavat käsitteiden merkitysten erilaisesta luonteesta ja alkuperästä.

Fysiikan kvantitatiivisten käsitteiden merkitykset ovat empiirisiä. Ne ovat peräisin tämän rakenteen ulkopuolelta, sitä edeltävältä kvalitatiiviselta tasolta. Ne seuraavat hahmotuksen kautta syntyneestä kvalitatiivisesta ymmärryksestä, joka perustuu intuitiiviseen ontologiseen vakaumukseen. Kvantifiointissa, joka primaarisesti muuntaa laadultaan tunnistettavat ominaisuudet määrällään mitattaviksi suureiksi, merkitykset siirtyvät sellaisinaan kvalitatiivisilta käsitteiltä vastaaville kvantitatiivisille käsitteille. Lait saavat empiirisen merkityksensä niiden elementteinä olevien suureiden merkityksistä ja teoriat edelleen niiden elementteinä olevien lakien merkityksistä.

Matematiikassa sen sijaan merkitykset ovat tämän hierarkkisen rakenteen sisäisiä. Ne perustuvat keskimmaiseen tasoon relaatioihin. Ensimmäisen tason käsitteillä, alkioilla, ei ole itseisarvoisia merkityksiä. Niiden merkitykset ovat puhtaasti rakenteellisia, keskimmaisen käsitetason relaatioiden määrittelemiä. Myös

matemaattisen teorian ainoa merkitys on rakenteellinen. Samoin kuin alkioden ainoat merkitykset ovat niiden keskinäiset relaatiot, *matemaattisen teorian merkitys on sen rakenne, relaatioiden verkko*.

Idealisena tavoitteena on teorian aksiomatisointi, rakenteen pelkistäminen *aksiomeiksi*, mahdollisimman pieneksi joukoksi perusrelaatioita, jotka virittävät koko rakenteen. Aksiomit ovat matemaattisen teorian merkityksen pelkistetty ydin. Koko teoria, kaikki sen mahdolliset väitteet, jotka nekin koskevat alkioden välisiä relaatioita, seuraavat loogisesti aksiomeista. (Sivuutamme tässä Gödelin lauseen, jonka mukaan matematiikkassakaan ei voi olla täydellisiä suljettuja loogisia kokonaisuuksia.) Hyvän mielikuvan tästä tavoitteesta antavat lukujen algebrallinen teoria, aksiomaattinen geometria, lineaaristen avaruuksien teoria, ryhmäteoria jne.

Fysikaalinen teoria sitä vastoin on *kvantifioitujen empiiristen merkitysten kausaalinen rakenne*. Teorian peruselementit ja -relaatiot, suureet ja lait, samoin kuin sen koko rakenne, ovat sidotut empiirisiin merkityksiinsä. Kausaalisuus itsessään on empiirinen merkitys. Teorian virittävät sen *peruslait*, jotka esittävät teorian kausaalisuuden perusidean. Niihin keskittyy siten teorian koko empiirinen merkitys, ja niihin perustuu teorian "mallintamiskapasiteetti". Rakenteellisesti ne rinnastuvat matemaattisen teorian aksiomeihin, mutta niitä ei voi pitää aidosti aksiomeina, koska niiden lähtökohtana on intuitiivinen empiirinen merkitys, eikä intuitiota voi aksiomatisoida.

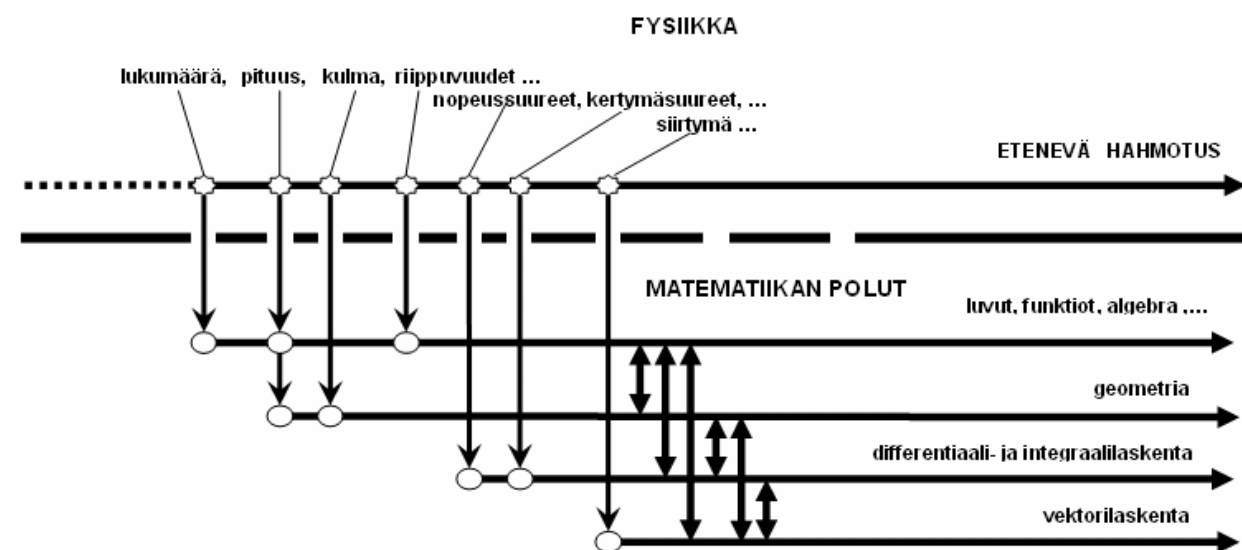
Matemaattinen teoria on *suljettu*, ja edustaa "apriorisia totuuksia": jos A (aksiomit) niin B (teorian lauseet). Fysikaalinen teoria on *avoin*, ja edustaa intuitiivisesti hahmottuvaa empiiristä todellisuutta. Sen peruslait ovat tietyn ilmiöalueen ilmiöiden idealisoitu perusmalli, joka tekee mahdolliseksi alueen ilmiöiden spesifisen mallintamisen. Sillä on tietty pätevyysalue, jossa se pätee tietyllä tarkkuudella ja joka laajenee fysiikan edistyessä.

1.4 Empirian portit matematiikkaan

Tieteen historiassa matematiikka ja fysiikka ovat kehittyneet ja kehittyvät jatkuvassa kiinteässä vuorovaikutuksessa. Ne tarvitsevat toisiaan, mutta niitä erottaa edellä tarkasteltu erilainen suhde empiriaan.

Kvantifiointi muuntaa ominaisuudet lukuarvoiksi suureiksi ja tekee näin mahdolliseksi empiiristen merkitysten matemaattisen käsittelyn graafisten esitysten, yhtälöiden jne. avulla. Teoreettisesta fysiikasta tulee empiiristen merkitysten matematiikkaa. Siinä teorioiden tarjoamista mallintamisen mahdollisuuksista käsin voidaan matemaattisiin merkityksiin nojautumalla, eli laskemalla, johtaa empiirisiä ennusteita, joiden testaaminen avaa tietä empiiristen merkitysten yleistämiseksi ja fysiikan käsiterakenteen kehittymiselle.

Ensimmäinen kvantifiointi, *lukumäärä*, oli pelinavaus, empirian *ensimmäinen portti* matematiikkaan. Edettäessä hahmotuksen polulla peräkkäisten kvantifiointien ketjussa tai verkossa, kohdataan tilanteita, joissa merkitysten kvantitatiiviseen esitykseen tarvitaan uudenlaisia matemaattisia esityksiä. Empiria motivoi muodostamaan ja ottamaan käyttöön uudenlaisia matemaattisia alkioita ja operaatioita ja antaa niille intuitiivisen hahmotusperustan. Avautuu yhä uusia empirian portteja.



Kuva 1.4 Empirian portit

Lukumäärän ja sen lakien esittämiseen tarvittiin luonnolliset luvut, yhteen- ja vähennyslasku. Tästä voitiin jatkaa matematiikan polulla. Lukukäsitteen yleistymistä ja uusien laskennallisten operaatioiden käyttöönottoa voidaan kuitenkin tarkastella myös lähtemällä siitä havaittavasta ominaisuudesta, jota suure *lukumäärä* esittää. Järjestettyjä joukkoja, niiden ryhmittelyä ja osittelua tarkastelemalla, esimerkiksi ruutupaperin tai palikoiden avulla, voidaan hahmottaa lukumäärää koskevia empiirisiä lakeja, joiden esittäminen johtaa kerto- ja jakolaskuun.

Tätä on mielenkiintoista pohtia pitemmällekin, ja matematiikan opetuksessa niin paljon tehdäänkin. On oivallettu, että matemaattista motivaatiota voidaan herättää empiiristen merkitysten kautta. Niistä saadaan tukea matemaattisesti etenevälle käsitteenmuodostukselle, ilman että tarvitsee puhua alentuvasti empiirisestä matematiikasta. Jatkan tästä vähän matkaa eteenpäin havainnollistaakseni, mitä tarkoitan.

Lukumäärä mahdollistaa kappaleen *pituuden* ja jaksollisiksi hahmottuvien ilmiöiden *jaksonajan* kvantifioinnin, joka tapahtuu yksinkertaisesti määrittämällä kuinka monta lyhemmän kappaleen pituutta pitempään sopii ja vertaamalla kahden ilmiön jaksojen lukumääriä samalla aikavälillä. Näin syntyvät, myös perinteisessä koulun matematiikan(!) opetuksessa, ensimmäiset dimensiolliset suureet, jotka tarjoavat positiivisille reaalityyppisille empiirisen hahmotusperustan.

Suorakulmion pinta-alan ja suorakulmaisen särmiön tilavuuden tarkastelu opetuksen perinteisellä tavalla on suureiden *pinta-ala* ja *tilavuus* primaarinen kvantifiointi, joka tarjoaa empiirisen merkityksen *reaalityyppisten kertolaskulle*. Ja esimerkiksi tasaisen liikkeen ja homogeenisen aineen tarkastelu suureiden *nopeus* ja *tiheys* kvantifiointina, tarjoavat empiirisiä merkityksiä *reaalityyppisten jakolaskun* perustaksi.

Suuntaeron kvantifiointi suureeksi *kulma* avaa tämän jälkeen tien kokojen ja muotojen käsitteelliseen hallintaan ja tarjoaa näin hahmotusperustan geometrialle tavalla, jota mm. Jaakko Joki on hyödyntänyt geometrian opetuksen kehittämiseen tähtäävissä tutkimuksissaan⁵.

Liikkeen kvantitatiivisessa tarkastelussa *siirtymä* tarjoaa empiirisen merkityksen *vektorien ja niiden yhteenlaskun* lähtökohdaksi. Projektiot tarjoavat *vektorien skalaaritulolle* ja suunnikkaan pinta-ala *vektoritulolle* empiiristä perushahmoa.

Empiiristen lakien kvantitatiiviset tutkimukset, joissa tarkastellaan yhden skalaarisuureen riippuvuutta toisesta, muodostavat yleisesti *funktion käsitteen* ja myös monien *yksinkertaisten algebrallisten funktioiden*, erityisesti *verrannollisuuden* luonnollisen hahmotusperustan. Myös *derivaatta* ja *integraali* voidaan ymmärtää riippuvuuden nopeuden tai voimakkuuden ja additiivisten suureiden kertymän empiiristen merkitysten esityksinä. Tätä voisi jatkaa miten pitkälle tahansa, tensoreihin, matriiseihin, vektoriavaruuksiin, Fourier-sarjoihin, Hilbertin avaruuksiin, ryhmäteoriaan jne. jne.

Näitä voidaan pitää hahmotuksen polulla aukenevina empirian portteina matematiikkaan. Fysiikka on etenemistä hahmotuksen polulla, matematiikka etenemistä matematiikan polulla, mutta fysiikkaa opiskeltaessa on välttämätöntä opiskella myös matematiikkaa. Samat matemaattiset käsitteet kohdataan kummallakin polulla. Portit voivat toimia molempiin suuntiin. Matemaattiset käsitteet voidaan ottaa fysiikassa käyttöön tunnettuina esittämisen välineinä tai ne voidaan ottaa käyttöön rakenteellisten empiiristen merkitysten reduktioina. Kohdattuun matemaattisen esityksen tarpeeseen voi olla valmis ratkaisu odottamassa portin takana matematiikan puolella. Mutta on mahdollista myös käyttää empiiristä merkitystä lähtökohdana uuden matemaattisen käsitteen tai operaation muodostamiseen. Saattaa olla, että tie käsitteeseen matematiikan polulla on pitkä, mutta tie sen empiiriseen merkitykseen hahmotuksen polulla on lyhyt. Silloin matematiikan opettaja tai opiskelija kokee, että käsite on vaikea ja fysiikan opettaja tai opiskelija, että se on helppo. Uskon, että näin on laita vektoreiden, derivaatan ja integraalin tapauksissa.

Matematiikan historiassa on runsaasti tapauksia, joissa empirian portin kautta on avautunut uusi, ennen kulkematon matematiikan polku, joka on johtanut kohti uutta aksiomaattisen teorian päämäärää. Moni matemaattinen teoria on saanut alkusysäyksensä empiirisistä merkityksistä ja niiden esittämisen tarpeesta. Eikä ole lainkaan ilmeistä, miten esimerkiksi aksiomaattinen geometria tai vektorien teoria voisivat seurata pelkän logiikan pakosta etenemällä puhtaana matematiikan polkua, joka alkaa luonnollisista luvuista. Jälkikäteen tällaisen reitin konstruktio on toki mahdollinen. Matemaatikon vaihtoehto intuitiivisesti hahmotetuille empiirisille merkityksille on *matemaattinen intuitio*, alkioiden ja operaatioiden intuitiivinen yleistäminen. Matemaatikon ylpeys

⁵ Jaakko Joki: *Ulkoluvusta hahmottavaan geometriaan*. Väitöskirja. Joensuun yliopisto. Didaktisen matematiikan sarja 1. Joensuun yliopistopaino (2002)
Jaakko Joki: *Hahmottavaa geometriaa*. Helsinki: Yliopistopaino (2004).

teorioista, jotka on luotu puhtaan matemaattisesti nojautumatta mihinkään empiirisiin lähtökohtiin ja jolla ei ehkä loppujen lopuksikaan ole mitään mahdollisia sovelluksia, on ymmärrettävä⁶.

Näillä kahdella polulla on hyvin samanlaiselta näyttävä suhde kuin empiirisellä ja teoreettisella lähestymistavalla. Opetuksen tai opiskelun käytännössä ne voisivat olla parhaimmillaan samalla tavalla toisiinsa erottamattomasti kietoutuneet etenemisen kaksisuuntaiseksi dynamiikaksi kuin empiirinen ja teoreettinen lähestymistapa ovat hahmottavassa lähestymisessä.

Usein sanotaan painokkaasti: "*matematiikka ei ole empiirinen tiede*" tarkoittaen, että matematiikan opetuksessa pitäisi edetä "matemaattisesti" nojautuen vain laskulakeihin. Mutta puhtaan matematiikan jalo idea, operointi pelkästään empiirisistä merkityksistä vapautetuilla rakenteellisilla merkityksillä, ei ole se tapa, jolla matematiikka on syntynyt historian mittakaavassa. Eikä se ole kovin hedelmällinen lasten matematiikanopetuksen ohjenuoranakaan. Idean voima tulee ilmi vasta kehityksen polun loppupäässä, jossa empiirisistä merkityksistä puhdistettuja abstrakteja matemaattisia rakenteita voidaan projisoida empiirisen tutkimuksen eri alojen merkityksille. Tällöin matematiikka saa aseman empiiristen tieteiden kvantitatiivisena metateorianana.

⁶ Vrt. G. H. Hardy: *Matemaatikon apologia*. suom. Kimmo Pietiläinen. Terra Cognita (1997), luku 21.

2. KVANTIFIOINTI FYSIIKAN KÄSITTEENMUODOSTUKSEN KYNNYSOPERAATIONA

2.1 Kvantifiointi

Kvantifiointi⁷ on sananmukaisesti kvantitatiiviseksi tekemistä, tai niin kuin sanakirja sen sanoo, *määrän antamista jollekin, jolla on aikaisemmin ajateltu olevan vain laatu*⁸.

Käsitteentuodostuksen perushahmotuksen intuitiiviset elementit, oliot, ilmiöt, ominaisuudet jne., ovat kvalitatiivisia käsitteitä. Ne ovat meidän tulkintaamme, hahmoja, mielikuvia, havaintojemme empiiristä merkityksiä. Niiden olemassaolo todellisuuden elementteinä on ihmisen intersubjektiveisen intuition mukainen ontologinen vakaumus. Kvantifiointi on tämän mielikuvarakenteen *operationalisointi* tavalla, joka tekee mahdolliseksi mielikuvan mukaisten odotusten kvantitatiivisen testaamisen mittaamalla. Ominaisuudet ovat se "heikoin lenkki", joka tekee tämän mahdolliseksi. Kvantifiointi toteutuu nimenomaan *ominaisuuksien kvantifiointina suureiksi*.

Standardin mukaan *"Suure on ominaisuus, joka voidaan laadultaan tunnistaa ja määrältään mitata. Luonnonilmiöiden mitattavat ominaisuudet ovat suureita."*

Tässä määrittelyssä mittaus tarkoittaa fysikaalista mittausta, joka on vaativa spesifinen operaatio. Kaikki kvantitatiivisuus ei ole mitattavuutta tässä mielessä, eikä kaikki sanakirjan mukainen "määrän liittäminen" ole mitattavaksi tekemistä. Aito kvantifiointi, joka muuntaa ominaisuuksia suureiksi, *säilyttää* hahmotetut kvalitatiivisen tason *empiiriset merkitykset* ja siirtää ne suureille laeille ja teorioille tai teoreettisille malleille.

Suureen *empiirinen merkitys* on sen merkitys tietyn olio- tai ilmiöluokan olioiden tai ilmiöiden hahmotettuna ominaisuutena. Tämä on suureen primaarinen ja pysyvä merkitys. Se voi yleistyä koskemaan laajempia olio- tai ilmiöluokkia taikka uusia olioita tai ilmiöitä, mutta se ei vaihdu.

Teoreettinen merkitys on rakenteellinen merkitys, jonka määrittää suureen asema teoriassa. Se riippuu teoriasta, sillä jokainen teoria on oma rakenteensa. Erityisesti kvanttimekaniikassa ja suhteellisuusteoriassa suureilla on aivan erilaiset teoreettiset merkitykset kuin niitä edeltävässä klassisessa fysiikassa, mutta myös klassisen fysiikan teorioiden kehitysvaiheissa suureiden asemat ovat muuttuneet⁹. Edellisessä luennessa tarkasteltu *"matemaattinen merkitys"* on empiirisestä merkityksestä eristetty, pelkistetty rakenteellinen merkitys.

Suureen merkityksen ymmärtämiseksi on, standardin määritelmän mukaisesti, ensin *tunnistettava* ominaisuus, jonka esittämiseen suureta tarvitaan, ja tietenkin samalla *identifioitava ne oliot tai ilmiöt* joiden ominaisuudesta on kyse. Tämä on suureen merkityksen ydin.

Toiseksi on *oivallettava*, miten tämä ensin vain kvalitatiivisena tunnettu ominaisuus voidaan *kvantifoida* eli muuntaa mitattavaksi tämän merkityksen perusteella eli "ominaisuuden omilla ehdoilla". Kvantifioinnin tulee tarjota mahdollisuus *yksikön valintaan* ja tähän yksikköön perustuvaan ominaisuuden *lukuarvoiseen esitykseen*.

Kvantifiointi on välttämätön, jotta ominaisuuden mittaaminen tulisi mahdolliseksi. Mutta se on eri asia kuin mittaaminen. Kaikki suureen mittausmenetelmät palautuvat jotakin teoreettista ja/tai empiiristä reittiä suureen kvantifiointiin.

Ominaisuuksien tunnistuksen ja kvantifioinnin tulisi olla fysiikanopetuksen lähtökohta. Ne eivät suinkaan ole itsestäänselvyksiä vaan empiirisesti oikeutettujen mielikuvien rakentamista, hahmotusta, jota on ohjattava "oikeiden" hahmojen tunnistamiseksi. Kokemukseni mukaan suureta koskeva peruskysymys: *minkä olion tai ilmiön mikä ominaisuus*, herättää opiskelijoissa yleensä vain hämmennystä. Käsite suureiden merkityksistä näyttää rajoittuvan standarditunnusten tietämiseen ja joukkoon kaavoja, joissa näitä tunnuksia esiintyy, ikään kuin viitteenä suureiden teoreettisista merkityksistä. Suureen esittämän ominaisuuden tunnistus on yllättävän vaikeaa, eikä kvantifioinnin ideasta ole mielikuvaa. Suureen empiiriset merkitykset ovat hämärän peitossa.

Fysiikan kvantitatiivisen käsittelyn näennäinen vaikeus kytkeytyy kriittisellä tavalla siihen, että sitä on yritetty oppia ja opettaa valmiina tuotteena "kaavojen" kautta. Algebralliset esitykset ovat kvantifioinnin "tuolla

⁷ Käytetään myös termiä *metrittäminen*, vrt. Niiniluoto: Johdatus tieteenfilosofiaan. Käsitteet ja teorianmuodostus. Otava (1980). Luku 2.

⁸ Webster's Encyclopedic Unabridged Dictionary of the English Language: quantify = to give quantity to something previously regarded as having only quality.

⁹ Kaarle ja Riitta Kurki-Suonio: *Fysiikan merkitykset ja rakenteet*. Limes ry., Helsinki, 1994. Luvun 3.2.3 kappale "Teorioiden näkökulma".

puolen". Niistä liikkeelle lähdetessä kvantifiointia ei edes ymmärretä kaivata. Mutta suureilta, laeilta ja teorioilta jäävät tällöin puuttumaan niiden empiiriset merkitykset, jotka ovat niiden ymmärtämisen avain. Ilman merkityksiään ne ovat käsittämättömiä.

2.2 Kvantifioinnin edellytykset

Jokainen ominaisuus on oma ongelmansa. Jokaista ominaisuutta varten on luotava oma suureensa¹⁰. Ominaisuudet ovat erilaisia. On kvantifioitavia ja kvantifioitumattomia ominaisuuksia, on eriasteista kvantifioitavuutta – sanakirjan mukaisen kielellisen merkityksen mielessä –, ja aidossakin kvantifioinnissa voidaan erottaa eri tyypejä tai lajeja. Kvantifioinnin monimuotoisuus ja sen ainutlaatuisuus kunkin ilmiöalueen ja kunkin ominaisuuden yhteydessä hämmentää ja yllättää yhä uudelleen. Sen tähden en edes pyri kattavaan esitykseen, vaan tyydyn tarkastelemaan esimerkkien valossa *aidon kvantifioinnin* periaatteita ja tuntomerkkejä sekä niiden rinnalla muunlaisia kvantitatiivisuuteen johtavia operaatioita, joissa aidon kvantifioinnin tuntomerkit eivät toteudu.

Jotta ominaisuus olisi kvantifioituva, sillä on oltava eri asteita. Jo ominaisuuden tunnistukseen liittyy tällöin *esikvantifioivia* havaintoja, "*komparatiivisia hahmoja*". Tämä merkitsee eri asteiden ja /tai asteen muuttumisen havaitsemista (suurempi /pienempi, suurenee /pienenee, voimakkaampi /heikompi, voimistuu /heikkenee tms.) ja sen toteamista, miten tällainen ominaisuuden eriasteisuus ilmenee.

Ominaisuudet mielletään varsin yleisesti eriasteisina. Tämä ilmenee kielestä, jossa ominaisuuksia vastaavat adjektiivit. Kaikilla adjektiiveilla on komparatiivimuoto! Mutta, kun tietyt vertailut, kuten pitempi, nopeampi, lämpimämpi, painavampi, voidaan helposti todentaa myös määrällisinä, monet muut, kuten parempi, kauniimpi, älykkäämpi, viisaampi, kalliimpi, tyylikkäämpi, punaisempi, ovat paljon enemmän subjektiivisten arviointien varassa. Jotta ominaisuus olisi kvantifioituva, on sen vertailtavuuden jo tällä kvalitatiivisella tasolla täytettävä *intersubjektiivisuuden vaatimus*.

Kvalitatiivisella tasolla kohdataan myös *kiinnitysongelma*, kysymys: *minkä ominaisuus?* Tämä liittyy *ominaisuuden invarianssin luonteeseen*, siihen, mistä tekijöistä ominaisuus on riippumaton ja mistä se riippuu. Puhumme esimerkiksi aineen väristä ja kappaleen painosta. Mutta nämä ominaisuudet eivät ole aidosti aineelle ja kappaleelle ominaisia. Aine näyttää eri väriseltä erilaisissa valaistuksissa. Kappaleen paino muuttuu, kun se viedään Maasta Kuuhun.

Ominaisuuden asteiden esikvantifioiva vertailu johtaa väistämättä *kvantifioiviin kysymyksiin*: kuinka paljon suurempi, voimakkaampi, kauniimpi jne. ja kuinka suuri, voimakas, kaunis jne. Vastaaminen vaatii ominaisuuden kvantifiointia. On monia erilaisia tapoja yrittää vastata näihin kysymyksiin.

Hinta. Poimin äskettäin käymästäni sähköpostikeskustelusta sitaatin: "*Kaupun sähköiset vaa'at kvantifioivat painon sijasta kappaleen toisen ominaisuuden nimittäin hinnan.*" Tavarahan hinta on toki kvantitatiivinen ominaisuus, kalleuden määrällinen esitys, joten hinnoittelu on kvantifiointia sanan kielellisessä merkityksessä. Hinnalla on yksikkö ja lukuarvo, mutta se ei silti ole suure fysiikan mielessä. Kalleus ei edes ole missään suhteessa tavaralle ominainen ominaisuus, josta voitaisiin tavaraa itseään tutkimalla saavuttaa intersubjektiivinen yksimielisyys. Hinta riippuu hinnoittelijasta, liikkeen hintapolitiikasta ja taustakustannuksista, ja se muuttuu tingittäessä. Ja mitä sille tapahtuukaan, kun tavara ostetaan, kun sitä käytetään ja kun se viedään kirpputorille edelleen myytäväksi? Hinnoittelu on subjektiivista *väkisin kvantifiointia*. Se on hinnoittelijan operaatio. Vaaka ei kvantifioi, sen tekee hinnoittelija. Vaaka ei edes mittaa hintaa. Se mittaa tavarahan painoa ja on ohjelmoitu ilmoittamaan tavaroiden hintoja määrittämänsä punnitustuloksen, tavarakoodin ja vaa'an elektroniikkaan syötettyjen hinnoittelutietojen perusteella.

Arvioinnit. Erilaiset arvostelut, arvioinnit, pisteitykset, kokeet, tentit, testit, arviointikeskustelut yms. ovat koulun ja opiskelun, nykyisin myös liike-elämän, valtionhallinnon jne. nykypäivää. Nekin ovat kvantifioinnin yrityksiä, jonkinlaista *pakkokvantifiointia*. Hallinnollinen tms. pakko vaatii "mittaamaan" suoritusten ja toimintojen laatua. Niiden ongelma on aivan prosessin lähtökohdissa, ominaisuudessa, joka on vaikeasti hahmotettava – oikeastaan valtava ominaisuuksien vyyhti. Sen yhdistäminen yhdeksi hyvyysominaisuudeksi on periaatteessakin mahdoton tehtävä. Ominaisuuden hahmotuksen intersubjektiivisuutta pyritään parantamaan yhteisillä ohjeilla ja sopimuksilla siitä, mitä painotetaan. Vertailut ja "mitat", joihin näin päädytään ovat väistämättä tulkinnanvaraisia ja subjektiivisia ja valitettavan usein mittaajan ennakkokäsitysten, jopa mielivallan sävyttämiä. Ne ovat operationaalisia sanan kielellisessä merkityksessä, koska ne toteutetaan tietyn operaation avulla, mutta eivät operationaalisia sanan varsinaisessa merkityksessä, johon kuuluu operaation toteuttajasta riippumaton toistettavuus ja intersubjektiivisuuden vaatimus. Ne eivät myöskään ole aitoja kvantifiointeja, sillä ne eivät perustu ominaisuuden asteiden suoraan vertailuun tavalla, joka nojautuisi ominaisuuden hahmotettuun

¹⁰ Vrt. K. Kurki-Suonio: *Massa opetuksen näkökulmasta*. Arkhimedes 4/2005.

merkitykseen. Eikä operaatio näin ollen voi olla kvantifioiva koe, joka tarjoaisi mahdollisuuden ominaisuuden voimakkuuteen perustuvaan yksikön valintaan ja sen mukaiseen lukuarvon määrittämiseen.

Kilpailut. Yksi kulttuurissamme varsin yleinen kvantifioinnin tarve esiintyy kilpailutilanteissa, joissa vertaillaan osanottajien tai heidän suoritustensa *kauneutta, taiteellisuutta, tyylikkyyttä tms.* Ongelma on tällöin periaatteessa samanlainen kuin hallinnollisissa pakkokvantifioinneissa mutta vaikuttaa käytännössä vähän yksinkertaisemmalta. Ominaisuuksien vyyhti, joka halutaan pelkistää yhdeksi tai kahdeksi vertailtavaksi ominaisuudeksi, on rajatumpi. Kunkin kilpailulajin alalla on myös kohtalainen yhteisymmärrys alan asiantuntijuudesta, ja kvantifiointi voidaan uskoa raadille tai tuomaristolle, jonka kykyyn hahmottaa ominaisuuden asteita luotetaan. On perusteltua puhua *sopimuskvantifioinnista*. Raati sopii järjestyksestä ja antaa ehkä pisteitä, jolloin saadaan ominaisuudelle näennäinen kvantitatiivinen arvio. Operaatio on usein kertaluonteinen ja perustuu raadin sitä tilannetta varten neuvottelemiin periaatteisiin. Yhteisesti tunnustettu asiantuntijuus sen perustana antaa sille kuitenkin intersubjektiviisuuden leiman. Erityisesti monissa urheilulajeissa, kuten kaunoluistelussa, voimistelussa ja mäkihypyissä on myös yleisesti sovittuja ja kirjattuja periaatteita, joiden uskotaan takaavan operaation toistettavuuden.

Älykkyydosamäärä. Älykkyys on esimerkki ihmisen persoonallisuuden ominaisuuksista, joiden mittaamiseen on kehitetty erityisiä psykologisia testejä. Tässäkin ongelman perusvaikeus on itse ominaisuuden hahmottamisessa. Älykkyyden luonteesta ja sen eriateisuuden ilmenemisen muodoista keskustellaan jatkuvasti, eikä kovin suurta yksimielisyyttä ole näköpiirissä. *Älykkyydosamäärä* on kuitenkin kohtalaisen intersubjektiviivinen "älykkyyden" mitta. Testeissä, joilla älykkyydosamäärää mitataan, tutkitaan tiettytyypisiä suoritteita, joissa menestymisen ajatellaan riippuvan älykkyydestä. Ne ovat saavuttaneet melko hyvän intersubjektiviivisuuden asteen. Testin tulokset ilmaistaan sovittulla asteikolla. Mutta, kuten aiemmissa esimerkeissä, kun itse ominaisuutta ei ole hahmotettu, ei aito ominaisuuteen perustuva kvantifiointikaan ole mahdollinen. Testi itse määrittelee samalla ominaisuuden, jota se mittaa. On täysin subjektiivisen tulkinnan varassa, mitä yhteyttä sillä on vaikeasti hahmotettavaan älykkyys-ominaisuuteen. Tätä voidaan edelleen pitää sopimuskvantifiointina. Sopimus on vain astetta yleisempi kestopopimus.

Beaufort ja richter. Tuulen voimakkuuden *Beaufortin asteikko* ja maanjäristyksen voimakkuuden *Richterin asteikko* voidaan edelleen luokitella sopimuskvantifioinneiksi. Niissä kvantifioitava ominaisuus, ilmiön voimakkuus, ja sen eriateisuus ovat varsin selvästi hahmotettavia. Nämä asteikot perustuivat alun perin ilmiöiden vaikutusten tarkkailuun ja kansainvälisestikin sovittuihin kvalitatiivisiin kriteereihin siitä, mitä ilmiössä havaitaan tapahtuvan asteikon eri voimakkuusasteissa. Nykyisin nämä asteikot on kytketty tuulen nopeuteen ja maanjäristyksen seismisten aaltojen energiaan ja intensiteettiin niin, että on voitu jopa määritellä yksiköt 1 beaufort ja 1 richter. Tässä ei kuitenkaan enää ole kysymys ominaisuuksien kvantifioinnista suureiksi, vaan yleisen käsitteenmuodostuksen yhteydessä kvantifioitujen suureiden käytöstä tarkasteltavien ilmiöiden esittämiseen.

Fooni ja magnitudi. Äänen äänekyyden *fooniasteikko* ja tähden näennäisen *kirkkauden magnitudiasteikko* perustuvat alun perin näiden ominaisuuksien aistinvaraiseen arvioon siitä, milloin äänen voimakkuus kuulostaa ja milloin tähden kirkkaus näyttää 2-, 3-, 4- jne. -kertaiselta. Ne eroavat siten edellisestä esimerkistä siinä suhteessa, että niissä havaitaan suoraan tarkasteltavaa ominaisuutta. Sen tähden ne tulevat selvästi astetta lähemmäs varsinaista kvantifiointia. Mutta niissäkään ei toteudu kvantifioinnin edellyttämä ominaisuuden asteen kvantitatiivinen vertailu, joka mahdollistaisi yksikön valinnan ja ominaisuuden mittaamisen siihen vertaamalla. Mahdollisuus tulkita nämä asteikot energia- tai intensiteettisuureiden avulla on ilmeinen, mutta kuten edellisessä tapauksessa tämä on valmiiksi kvantifioitujen suureiden soveltamista ääneen ja valoon.

2.3 Aito kvantifiointi

Mitkään esitetyistä esimerkeistä eivät siis ole fysiikan käsitteenmuodostuksen varsinaista kvantifiointia, jossa ominaisuus muunnetaan suureksi, vaikka kahdessa viimeisessä tapauksessa asteikot onkin voitu myöhemmin "kalibroida" kytkemällä ne fysikaalisten suureiden avulla ilmaistuihin suuruuksiin. Niiden operaatiot eivät ole kvantifioivia kokeita, joissa "luonto pakotettaisiin täsmentämään hahmotetun ominaisuuden merkitys kvantitatiiviseksi". Ne eivät perustu ominaisuuden asteiden täsmälliseen vertailuun, joten niissä ei saada tähän perustuvaa yksikköä.

Kvantifioiva koe on toistettava kvantitatiivinen koesarja. Siinä toteutetaan *kvantifioivan idean* mukainen spesifinen, usein varsin suppea, *ideaalitalanne*, jossa tarkasteltava ominaisuus on *invariantti*. Ominaisuuden tulee esiintyä kokeessa eriateisina tavalla, joka tekee asteiden kvantitatiivisen vertailun mahdolliseksi. Kokeessa tulee tällöin mahdolliseksi valita, periaatteessa mielivaltaisella tavalla, *yksikköolio tai -ilmiö*, jonka ominaisuuden suuruus tai voimakkuus asetetaan *yksiköksi*. Näin vertailu kiinnittää ominaisuuden asteen lukuarvon valituissa yksiköissä ja muuntaa ominaisuuden suureksi. Samalla tulee todennetuksi suureen säilyminen koejärjestelyn mukaisissa ideaalitalanteissa, ja siitä tulee *suureen määrittelylaki*. On tärkeätä kiinnittää huomiota invarianssin luonteeseen eli siihen, mistä tekijöistä koe osoittaa suureen olevan

riippumaton, sillä tämä ilmaisee samalla suureen *kiinnityksen* eli sen, minkä olion tai ilmiön ominaisuutta suure esittää. Ainakin implisiittisesti tämä sisältyy jo kvantifioivaan ideaan ja edellyttää kokeen järjestämistä koesarjana, jossa invarianssi todetaan varioimalla koejärjestelyn parametreja tarkoituksenmukaisella tavalla.

Aitojen kvantifiointien lähtökohdaksi tarvitaan intersubjektiviisen intuition mukainen tai sen perusteella oivallettu *rakenteellinen idea*, alkumielikuva tai perushypoteesi, joka katsotaan vahvistetuksi, kun kvantifiointi johtaa sen kanssa yhteensopivaan lopputulokseen. Tällainen idea toimii jo kvalitatiivisella tasolla merkitysten strukturoitumisen perustana ja johtaa kvantifiointien ja suureiden ketjuun tai verkkoon, jossa edettäessä myös kvantifiointien luonne asteittain kehittyy.

Rakenteellisen idean lisäksi tarvitaan kutakin ominaisuutta varten oma *kvantifioiva idea*, ominaisuuteen itseensä perustuva *intuitiivisesti ilmeinen tapa verrata* olioiden tai ilmiöiden saman ominaisuuden asteita. Jokainen suure on näin oma ainutlaatuinen ongelmansa, joten kvantifioinnin luonteen kattava esitys vaatisi kutakuinkin kaikkien suureiden läpikäyntiä. Tämä ei ole tässä mahdollista, joten tarkastelen seuraavassa vain ensimmäisiä vaiheita kvantifiointien ketjussa ja joitakin täydentäviä esimerkkejä pohtien niiden valossa kvantifiointien luonnetta. Kiinnitän erityisesti huomiota niiden perustana oleviin intuitiivisiin ideoihin näiden luentojen teeman mukaisesti.

2.4 Suureiden ketjun alkuvaiheet

Vaihe 0. Lukumäärä. Ketjun lähtökohta on oliojoukkojen ja tapahtumasarjojen suuruuksien kvantifiointi suureeksi *lukumäärä*, jonka mahdolliset arvot määrittelevät luonnolliset luvut. Se perustuu olioiden ja tapahtumien hahmottumiseen *yksilöityvinä ja erillisinä* ja tästä johtuvaan niiden joukkojen *suuruuksien additiivisuuteen*. Tämän **alkukvantifioinnin** intuitiivinen idea palautuu siten suoraan ontologisen vakaumuksemme mukaiseen mielikuvarakenteeseen.

Vaihe 1. Pituus ja aika. Ensimmäinen laji. Lukumäärien määrittäystä voidaan tämän jälkeen käyttää hyväksi *olion pituuden ja tapahtumien aikavälin* tai *ilmiön keston* kvantifioinnissa. Niiden rakenteellisena perusideana on *avaruuden ja ajan homogeenisuus ja isotrooppisuus* ja kvantifioivana ideana tiettyjen ilmiöiden hahmottuminen *jaksollisiksi* sekä *pituuksien ja kestojen additiivisuus*.

Kvantifioivissa kokeissa määritetään lukumääriä. Jaksollisten ilmiöiden samana aikana tapahtuvien jaksojen lukumäärien suhteet voidaan todeta invarianteiksi. Jokin jaksollinen ilmiö voidaan valita yksikköilmiöksi ja sen jaksonaika aikavälin yksiköksi ja lasketaan tutkittavan ilmiön keston aikana tapahtuvien jaksojen lukumäärä. Intuitiivisesti ymmärretyt jaksollisuus ja jakson kestojen additiivisuus merkitsevät, että tämä lukumäärä ilmaisee ilmiön keston valituissa yksiköissä. Vastaavasti voidaan valita pituuden yksikkökappale, mittatikka, ja tehdä vertailemalla mielivaltaisen määrä *yhtä pitkiä* tikkuja. Niitä voidaan tämän jälkeen asettaa peräkkäin mitattavan kappaleen rinnalle ja laskea tarvittavien yksiköiden lukumäärä. Näin määritellyt suureet pituus ja kesto ovat invariantteja ajan, paikan ja asennon suhteen, joten ne ovat pysyville olioille ja (toistettaville) ilmiöille ominaisia.

Tapa, jolla koulussa tavallisesti tutustutaan pituuden ja ajan mittaamiseen, on siis aivan "oikeaoppista" kvantifiointia, vain tarkoituksenmukaisella tavalla virtaviivaistettua. Mutta niistä tehty yleistys, jonka mukaan mitattaessa tutkitaan montako yksikköä mitattavaan suureeseen mahtuu, on kummallinen. Mitähän oppilaat sen perusteella ajattelevat esimerkiksi nopeuden, sähkövirran tai lämpötilan mittaamisesta?

Olion pituus ja ilmiön kesto edustavat kvantifioinnin perustyyppiä, jota voidaan kutsua **1. lajin** tai **primaarikvantifioinniksi**. Sille on yleisemmin ominaista nojautuminen *intuitiiviseen vertailuperiaatteeseen*, usein tilanteen *symmetriaan*, erityisesti ideaan "samanlaisuus merkitsee yhtäsuuruutta" ja mahdollisesti *ominaisuuden additiivisuuteen*, jonka perusteella esimerkiksi ominaisuuden kaksinkertaistuminen tai puolittuminen mielletään ilmeiseksi. Edempänä tulee vastaan muita esimerkkejä.

Vaihe 2. Nopeus. Toinen laji. Ketjussa seuraava rakenteellinen perusidea on Newtonin suuri oivallus, *kappaleiden välisen vuorovaikutuksen hahmottuminen niiden liiketilojen muutosten yhteiseksi syyilmiöksi*. Siitä seuraa vapaan kappaleen ja *jatkavuuden lain idea*, joka on *liikkeen nopeuden* kvantifioiva idea.

Kvantifioivassa kokeessa on toteutettava vapaan kappaleen idea. Se edellyttää tietenkin, että joillakin intuitiivisilla perusteilla vuorovaikutusten esiintyminen ja erityisesti niiden puuttuminen tilanteesta on mahdollista todentaa. Maanpäällisissä olosuhteissa tähän liittyy myös suuntaspesifisyyden ajatus, jonka mukaan pystysuunnassa tasapainotettu kappale voi olla vaakatasossa vapaa. Kokeessa tutkitaan tällä tavalla vapaaksi ymmärretyyn kappaleen siirtymää Δs eri aikaväleinä Δt . Kokeessa todettu verrannollisuus $\Delta s \sim \Delta t$ on jatkavuuden lain idean mukainen, joten koe tukee sen perustana olevan intuition oikeutusta. Invariantti vahvistuu aikavälistä riippumattomaksi ja siis koko liikeilmiölle, *vapaan kappaleen liikkeelle*,

ominaiseksi suureeksi. Koska sen suuruussuhteet erilaisia liikkeitä tutkittaessa vastaavat hahmottuvan nopeus-ominaisuuden komparatiivisia hahmoja, se voidaan määritellä ominaisuutta vastaavaksi suureeksi.

Tähän liittyy kaksi tärkeää yleisempää huomiota:

Ensimmäinen koskee jatkavuuden lain luonnetta. Tässä tulee korostetusti esille se, että se on ensi sijassa intuitiivinen idea. Empiirisenä lakina sitä voidaan pitää vain siinä suhteessa, että kvantifioivan kokeen tulos antaa jälkikäteen täyden tuen tälle idealle.

Toinen koskee kvantifioivassa kokeessa, yleisemmin kaikissa kokeellisissa tutkimuksissa, välttämätöntä idealisointia. Idealisoinnin on aina oltava *empiirisesti perusteltu*. Ideaalitalanne on aina saavuttamaton, mutta poikkeama ideaalista on voitava tehdä periaatteessa miten pieneksi tahansa. Tämän vaatimuksen toteutumisesta voidaan vakuuttua vain intuitiivisin perustein ja se kuuluu olennaisesti kokeen ideointiin. Nopeuden kvantifioinnissa vapaan kappaleen idean vaatiman idealisoinnin toteutus voidaan ymmärtää empiirisesti perustelluksi sen kautta, että liikevastuksia voidaan aina pienentää parantamalla koejärjestelyä. Tämä koskee yhtä hyvin vierivää kuin liukuvaakin kappaletta. Vastakkainen esimerkki on vapaiden kappaleiden törmäysten tutkiminen käyttämällä vieriviä kappaleita, jolloin ulkoisten voimien vaikutusta törmäystilanteessa ei voida pienentää tiettyä alarajaa vähäisemmäksi.

Liikkeen nopeus edustaa kvantifioinnin toista perustyyppiä, jota voidaan kutsua **2. lajin** tai **sekundaarikvantifioinniksi**. Siinä ominaisuus hahmottuu jo alunperin joidenkin tunnettujen suureiden riippuvuuden asteena. Suure kvantifioituu tällöin riippuvuuden voimakkuutta esittävänä invarianttina.

Tämä invarianssi voi sisältyä suoraan kvantifioivan idean edellyttämään ideaalitalanteeseen. Nopeutta kvantifioitaessa se sisältyy vapaan kappaleen ideaan. Vastaavasti aineen tiheyden kvantifiointi perustuu homogeenisen aineen ideaan, joka suoraan viittaa aineesta otetun näytteen massan ja tilavuuden suhteen $\Delta m/\Delta V$ invarianssiin.

On myös mahdollista, että invarianssi havaitaan kvantifioivan kokeen empiirisenä tuloksena. Esimerkiksi *jousen jäykkyyden* kvantifioivassa kokeessa havaitaan venymän verrannollisuus venyttävään voimaan $\Delta s \sim \Delta F$. Invariantti suhde $\Delta F/\Delta x$ voidaan määritellä jousen jäykkyyttä esittäväksi *jousivakioksi*. Vastaavasti virtapiirejä tutkittaessa todetaan, että sähkövirta johtimessa on verrannollinen johtimen päiden väliseen jännitteeseen, $I \sim U$. Invariantit U/I ja I/U voidaan määritellä johtimen resistanssiksi ja konduktanssiksi, jotka esittävät johtimen kykyä vastustaa ja johtaa virtaa.

Jotta todettu invariantti voitaisiin ymmärtää ominaisuutta esittäväksi suureeksi, on sen suuruuden eri tilanteissa vastattava ominaisuuden "komparatiivista hahmotusta", ainakin sen on oltava systemaattisesti suurempi kokeissa, joissa ominaisuus on voimakkaampi.

Vaihe 3. Massa. Nopeuden kvantifiointi vapaan kappaleen liikkeen invarianttina tekee mahdolliseksi ketjussa seuraavan tärkeän kvantifioinnin. *Hitaus* kappaleen hahmotettuna ominaisuutena merkitsee "kappaleen kykyä vastustaa liiketilan muutoksia. Newtonin suuri rakenteellinen perusidea, *vuorovaikutus kappaleiden liiketilojen muutosten yhteisenä syyilmiönä*, johtaa nyt kvantifioivaan ideaan, jonka mukaan kahden kappaleen (A, B) *vuorovaikutus vertaa niiden hitauksia*. Jos B:n nopeus vuorovaikutuksessa muuttuu enemmän, sen hitaus on pienempi. Jos se on kaksi kertaa niin suuri kuin A:n, sen hitaus on puolet A:n hitaudesta. Idean toteutus edellyttää kvantifioivaa koetta, jossa kaksi vapaata kappaletta on lyhytaikaisessa vuorovaikutuksessa.

Kokeen ideaalitalannetta voidaan lähestyä törmäyskokeilla, joissa mitataan kappaleiden tasaisten liikkeiden nopeudet ennen ja jälkeen törmäyksen. Kokeen tulokset vahvistavat idean oikeutuksen. Kappaleiden nopeudenmuutosten itseisarvojen suhde $|\Delta v_A|/|\Delta v_B|$ on invariantti, riippumaton kappaleiden nopeuksista ja vuorovaikutuksen luonteesta, ja kaikki useampien kappaleiden tällaiset suhteet voidaan ilmaista kappalekohtaisten kiinteiden suhdelukujen avulla. Kun mielivaltaisesti valitun yksikkökappaleen hitaus otetaan yksiköksi, kaikkien kappaleiden hitaudet saavat kappaleille ominaiset lukuarvot. Näin syntyy hitautta esittävä suure, massa. Sen määrittelylaiksi saadaan verrannollisuus $m_A/m_B = |\Delta v_B|/|\Delta v_A|$, joka pätee kaikissa samojen kappaleiden vuorovaikutuksissa. Prosessi on luonteeltaan 1. lajin eli *primaarikvantifiointi*, jossa vuorovaikutus toimii hitauksien intuitiivisena vertailuperiaatteena.

Tässä tulee korostetusti esiin *kvantifioinnin ja mittaamisen ero*. Kappaleiden massat tulevat toki mitatuiksi kvantifioivassa kokeessa, mutta koe on siihen tarkoitukseen epäkäytännöllinen. Se kuitenkin johtaa käsitteenmuodostuksessa edelleen muihin mekaniikan peruskäsitteisiin, erityisesti liikemäärään ja voimaan. Tätä kautta tulee mahdolliseksi todentaa empiirisesti kappaleeseen vaikuttavan painovoiman verrannollisuus sen massaan $G \sim m$, johon massan määrittäminen perustuu. On merkillepantavaa, että tämän

verrannollisuuden empiirinen todennus on yksi fysiikan tarkimpia kvantitatiivisia kokeita. Vaikka kvantifioiva koe ei mittaa suuretta kovin tarkasti, se määrittelee sen merkityksen tarkasti ja tekee näin mahdolliseksi tarkemmat mittausten menetelmät.

Vaihe 4. Liikemäärä ja impulssi. Kolmas laji. Vapaiden kappaleiden törmäyskoe toimii suoraan, ilman uusia täydentäviä kokeita myös sekä *liikkeen määrän* että *vuorovaikutustapahtuman voimakkuuden* kvantifioivana kokeena.

Kun kokeessa kiinnitetään huomio myös nopeudenmuutosten vastakkaissuuntaisuuteen, massan määrittelylaki voidaan kirjoittaa myös vektorimuotoon $m_A \Delta \mathbf{v}_A = -m_B \Delta \mathbf{v}_B$. Jotta käsitteistö toteuttaisi Newtonin oivalluksen mukaisen rakenteellisen perusidean vuorovaikutuksesta liiketilän muutosten yhteisenä syynä, näitä muutoksia on kuvattava suurella, jonka avulla ilmaistut muutokset ovat yhtä suuret. Liiketilaa esittäväksi suureksi on siten otettava *liikemäärä* $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$.

Liikemääränmuutosten yhteinen suuruus ilmaisee samalla vuorovaikutustapahtuman voimakkuuden ja toimii sen mittana. Rakenteellisessa ideassa on olennaista, että kappaleen liike ja kahden kappaleen vuorovaikutus ovat eri ilmiöitä. Sen tähden niiden voimakkuuksia esittämään tarvitaan omat suurensa. Kun edellistä esittää *kappaleen liikemäärä*, jälkimmäinen nimitetään *vuorovaikutuksen impulssiksi*. Tämä suure on luonteeltaan oikeastaan kaksisuuntainen *bivektori*, jonka suuruuden ilmaisevat yhtä suuret ja vastakkaissuuntaiset liikemäärien muutokset. On ilmeisen tarkoituksenmukaista puhua vuorovaikutuksen vaikutuksista erikseen kumpaankin osapuoleen ja ottaa käyttöön *vuorovaikutuksen kappaleelle antama impulssi*, joka siis oikeastaan on impulssibivektorin toinen osapuoli ja yhtä suuri kuin vuorovaikutuksen aiheuttama liikemäärän muutos $\mathbf{I} = \Delta \mathbf{p}$. Näin muodostuu mekaniikanopetuksen perinteinen mielikuva impulssista ja vastaimpulssista.

Newtonin rakenteellinen perusidea luo tällä tavalla perustan Newtonin mekaniikan koko peruskäsitteistön kvantifioinnille. Se johtaa suureiden määrittelylakeihin, jotka on helppo tunnistaa Newtonin mekaniikan kolmen peruslain makromuodoiksi.

Liikemäärän ja impulssin kvantifioinnit ovat aitoja empiiristen merkitysten kvantifiointeja. Niillä tosin ei ole omia kvantifioivia kokeita, vaan niiden määrittelylait seuraavat massan kvantifioivasta kokeesta niiden merkitysten perusteella. Tämä voidaan nimetä **3. lajiksi**, aiemmin kvantifioituihin suureisiin nojautuvaksi **kvantifioitumiseksi empiiristen merkitysten kausaalisen rakenteen perusteella**.

Periaatteelliselta kannalta kannattaa kiinnittää huomiota näiden kahden suureen kvantifiointien eroon. Liikemäärä kvantifioituu suoraan liiketilän määrälliseksi esitykseksi liiketilän muutoksen hahmotetun rakenteellisen merkityksen perusteella. Impulssin kvantifiointi on väliellinen. Se perustuu vuorovaikutusilmiön vaikutuksiin, joiden voimakkuus ensin kvantifioitui mitattavaksi. Tässä suhteessa se rinnastuu myöhemmin tarkasteltavaan mittarikvantifiointiin.

2.5 Täydentäviä esimerkkejä

Paino. *Kappaleen paino* on pituuden ja aikavälin ohella yksi ihmiskunnan ensimmäisiä fysikaalisia suureita. Sekin syntyy 1. lajin kvantifioinnissa. Kvantifioiva koe on painojen vertailu punnitsemalla. Idea perustuu symmetriaan ja painon additiivisuuden ajatukseen. On intuitiivisesti ilmeistä, että tasavartisen vaa'an vaakakupeissa olevat kappaleet painavat yhtä paljon, jos vaaka on *tasapainossa*, ja että n yhtä suuren kappaleen yhteinen paino on n -kertainen yhden kappaleen paino. Näin voidaan valmistaa samanpainoisia yksikköpunnuksia ja edelleen yksikön monikertojen ja tasaosien muodostamia punnussarjoja, joita voidaan käyttää erilaisten kappaleiden punnitukseen.

Painon kiinnittyminen kappaleen ominaisuudeksi oli ymmärrettävä virhe. Painon riippuvuus paikasta Maan pinnalla on niin vähäistä, ettei sitä helposti havaitse, punnitus suhteellisenä mittauksena ei sitä paljasta, eikä suora painon määrittely yksinkertaisin menetelmin jollakin jousivaa'an tapaisella välineellä ole riittävän tarkka. Kiinnityksen takana kummitteli myös antiikin mielikuva painosta kappaleen omana pyrkimyksenä alaspäin. Painon riittävän tarkka mittaaminen voimana vahvistaa kuitenkin jo maanpäällisissä mittauksissa sen, ettei se ole kappaleen invariantti ominaisuus. Mutta vasta Newtonin rakenteellinen perusoivallus paljasti painon kappaleen ja Maan (tai jonkin muun keskuskappaleen) vuorovaikutuksen voimakkuutta esittäväksi suureksi, joka on perusluonteensa mukaisesti kappaleeseen ja Maahan vaikuttavien voimien muodostama *bivektori*.

Ainemäärä. *Aineen määrän* kvantifiointi *ainemääräksi*, jonka SI-yksikkö on mooli, on empiirisesti oikeutetun atomifysiikan lähtökohta. Sekin on primaarikvantifiointi. Eri aineiden väliset *kemialliset reaktiot* muodostavat ymmärrettävän intuitiivisen vertailuperustan aineiden määrien vertaamiseksi. Ne tarjosivat menetelmän, jonka perusteella voitiin saada mielekäs vastaus kysymykseen, milloin kahta eri ainetta on sama määrä. Kvantifioiva koe on tässä tapauksessa koko se kemiallisten reaktioiden kvantitatiivisten tutkimusten joukko,

joka on tarvittu aineille ominaisten suhteellisten atomimassojen ja moolimassojen määrittämiseen. Niiden perusteella periaatteessa mielivaltainen määrä mielivaltaista ainetta voitiin valita yksiköksi, jonka jälkeen reaktioiden perusteella määräytyvät suhdeluvut ilmaisevat, kuinka paljon mitä tahansa muuta ainetta sisältää yksikön suuruisen ainemäärän.

2.6 Mittarikvantifiointi

Ominaisuutta voidaan lähteä kvantifioimaan myös ottamalla lähtökohdaksi ominaisuuden itsensä sijasta jokin jo tunnettu suure, joka riippuu riittävän ilmeisellä ja yksinkertaisella tavalla tarkasteltavasta ominaisuudesta. Esimerkiksi sopii *elohopeapatsaan pituuden* ottaminen *lämpötilan* mitaksi.

Tämä on hyvin yleinen mittaamisen periaate. Suureita mitataan mittareilla, joissa esimerkiksi osoittimen kiertymä toimii suureen mittana. Osoittimen kääntymisellä on kausaaliyhteys ilmiöön, johon mitattava suure liittyy, mutta kulma suureena ei liity millään tavalla suureen merkitykseen ominaisuutena. Samoin lämpölaajenemisen vuoksi lämpömittarin elohopeapatsaan pituudella on kausaalinen yhteys patsaan lämpötilaan, mutta pituus suureena ei kuvasta lämpötilan merkitystä aineen ominaisuutena.

Taas on huomattava suureen kvantifioinnin ja mittaamisen ero. Suuretta ei ole olemassa käsitteenä ennen kuin se on kvantifioitu, eikä sitä sen tähden voi mitatakaan. *Mittarikvantifiointi* asettaa "mittarisuureen" tarkasteltavan ominaisuuden mitaksi. Aito kvantifiointi se ei ole, koska se ei perustu ominaisuuden asteita vertailevaan kvantifioivaan kokeeseen, jossa voitaisiin valita ominaisuuden yksikköaste. Yksikkönä on mittarisuureen yksikkö tai jokin sen sopivaksi koettu kerrannainen, jolle voidaan antaa oma nimi "silmlumeeksi". Vasta kvantifioinnin jälkeen mittari voidaan kalibroida niin, että se mittaa suuretta tämän omissa yksiköissä. Mittari "määrittelee" mitattavan suureen samassa mielessä kuin älykkyyssosamäärä älykkyyden tai Beaufortin ja Richterin asteikot tuulen ja maanjäristyksen voimakkuuden. Operaationa se on kuitenkin näistä poiketen täsmällinen, koska se perustuu täsmällisesti määriteltyyn suureeseen. Sitä voidaan siten pitää täsmennettynä sopimuskvantifiointina. Mittarisuureen ja yksikönvalinnan periaatteellisen mielivaltaisuuksien vuoksi olen käyttänyt siitä myös nimitystä *ad hoc kvantifiointi*.

Lämpötilan mittarikvantifiointi toimii kuitenkin lähtökohdana myös lämpötilan määrittelylle suureena siksi, että sen perustana on kantava rakenteellinen mielikuva lämpöilmiöistä. Mielikuvan ytimenä on *lämpötasapainon idea*, jonka mukaan kosketuksissa olevat kappaleet asettuvat samaan lämpötilaan. Se sisältää myös alustavan ajatuksen siirtävästä lämmöstä ja kappaleiden lämmönvarauskyvystä, joka on ilmeisesti suuri suurilla ja pieni pienillä kappaleilla. Näin ymmärretään, että mittari oman lämpötilansa ohella näyttää myös sitä (riittävän hyvin) koskettavan kappaleen lämpötilan ja että mittarin oman lämmönvarauskyvyn on oltava mitätön. Mittaria käyttämällä saadaan tälle rakenteelliselle mielikuvulle selvä empirinen tuki.

Lämpötilan kvantifioivana kokeena on ideaalikaasun lakien tutkimus. Niissä suure pV/n , missä p , V ja n ovat kaasun paine, tilavuus ja ainemäärä, osoittautuu invariantiksi, harvan kaasun rajalla samassa lämpötilassa samaksi kaasun lajista riippumatta. Luonteeltaan tämä suure vastaa intuitiivista mielikuvaa lämpötilan merkityksestä kaasun tilaa esittävänä suurena. Se olisi sen tähden voitu hyvin ottaa suoraan lämpötilan määritelmäksi, mutta lämpöopin historiassa aika ei ollut siihen vielä kypsä. Lämpötilalle olisi näin saatu sen myöhemmin ymmärrettyä merkitystä vastaava *moolisen energiatheyden* yksikkö. Erillinen lämpötilan yksikkö ja moolinen kaasuvakio yksiköiden välisenä muunnoskertoimena olisivat jääneet tarpeettomiksi. Tästä riippumatta kyseessä on ilmeinen toisen lajin kvantifiointi, jossa lämpötila fysikaalisena suureena syntyy. Sen perusteella alun perin mittariin perustuva *ad hoc* yksikkö on voitu täsmäntää fysikaaliseksi yksiköksi.

Punnitus on vastaavalla tavalla alun perin sekä kuvitellun aineen määrän että massan mittarikvantifiointi. On intuitiivisesti välttämätöntä, että aineen määrän ja massan kasvaessa paino kasvaa. Mutta painoa ei missään suhteessa voi pitää aineen määräksi tai hitaudeksi hahmottavana ominaisuutena.

Sähköoppikin alkaa mittarikvantifioinneista, sillä *sähkövarauksen* ja *sähkövirran* mitoiksi on ensin otettu varattuun kappaleeseen vaikuttava *sähköinen voima* ja virtajohtimeen kohdistuva *magneettinen voima*. Voima on kuitenkin vuorovaikutuksen ominaisuus. Varaus ja sähkövirta sen sijaan mielletään kappaleen tai johtimen ominaisuuksiksi. Tässä on takana rakenteellinen mielikuva, jonka mukaan kappaleen varaus ja johtimen virta ominaisuuksina ovat niiden kykyä sähköiseen ja magneettiseen vuorovaikutukseen. Se johtaa nytkin eteenpäin.

Kvantifioivat kokeet perustuvat symmetrian ja additiivisuuden intuitiivisiin ideoihin. Kun johdinkappaleeseen tuodaan varausta n erässä, jotka koejärjestelyn perusteella ovat uskottavasti yhtä suuria, saadaan kappaleelle ilmeisesti n -kertainen varaus. Samalla havaitaan kappaleeseen vaikuttavan sähköisen voiman n -kertaistuminen. Coulomb teki vastaavan kokeen jakamalla yhden kappaleen varausta samanlaisten kappaleiden kesken, jolloin hän sai sarjan varauksen murto-osia 1 , $1/2$, $1/3$, ..., ja totesi vastaavan sähköisen voiman heikkenemisen n :nteen osaan. Intuitiivisesti ilmeinen n -kertainen sähkövirta syntyy n

rinnan kytketyn johtimen "koontijohtimeen, jolloin voidaan todeta magneettisen voiman n -kertaistuminen. Tällaiset kokeet ovat mittauksina epätarkkoja varsinkin sähköstatiikassa, mutta niillä on tärkeä periaatteellinen merkitys. Ne tukevat lähtökohtana olevaa rakenteellista mielikuvaa ja täydentävät ad hoc -mittauksen aidoksi kvantifioinniksi.

2.7 Ja niin edespäin

Lämpöopissa lämpömäärän ja aineen ominaislämpökapasiteetin kvantifioinnit ovat tärkeä seuraava vaihe. Niiden intuitiivisena perustana on lämmön säilymisen ja additiivisuuden mielikuva sekä ajatus, että n -kertainen määrä ainetta vaatii n -kertaisen määrän lämpöä lämmitäkseen yhtä paljon. Kvantifioivissa kokeissa vertaillaan kahden yksiainesysteemin (A, B) lämpötilojen muutoksia ΔT_A ja ΔT_B , kun erilämpöisiä aineita saatetaan lämpökontaktiin. Kun käytetään eri määriä samaa ainetta, kokeessa saatu, käytetyistä massoista ja alkulämpötiloista riippumaton tulos $m_A \Delta T_A = -m_B \Delta T_B$ vahvistaa mielikuvan siirtyvästä lämpömäärästä ja suure $m|\Delta T|$ tarjoutuu siirtyvän lämpömäärän mitaksi. Kun kokeessa on samat määrät eri aineita, koe vertaa aineiden lämmönvarausrakenteita. Voidaan valita yksikköaine, jolloin kokeesta tulee aineen ominaislämpökapasiteetin tyyppinen 1. lajin kvantifiointi.

Virtapiirien tutkimuksessa *pariston voimakkuuden* kvantifiointi lähdejännitteeksi perustuu symmetriaan ja additiivisuuteen sekä mielikuvaan, jonka mukaan n samanlaista paristoa sarjassa muodostavat voimakkuudeltaan n -kertaisen lähteen. Tämä mielikuva rinnastuu sähkövirran kvantifioinnin perusmielikuvaan ja hahmottuu yhdessä sen kanssa virtapiirien esikvantifioivissa tarkasteluissa, jossa voidaan käyttää esimerkiksi samanlaisia lamppeja.

Valo-opissa aineen taitekerroin on mielenkiintoinen esimerkki. Valon tulokulmasta riippumaton invariantti $\sin\alpha/\sin\beta$ on helppo todentaa kokeellisesti ja mieltää aineparille ominaiseksi taitesuhteeksi, joka kvantifioi taittumislain voimakkuuden aineiden rajapinnassa. Tämän lausekkeen keksiminen sen sijaan on haastavampaa ja edellyttää taustakseen varsin yksityiskohtaista mielikuvaa aaltoliikkeen käyttäytymisestä rajapinnassa. Taitesuhde syntyy näin 2. lajin kvantifioinnissa. Sen sijaan eteneminen tästä ainekohtaiseen taitekertoimeen voidaan ymmärtää 1. lajin kvantifioinniksi, jossa taittumislain itse toimii aineiden taittokykyjen vertailuperiaatteena. Yksikköaineeksi valitaan luontevasti tyhjiö. Taitekertoimen kiinnittyminen yhden aineen ominaisuudeksi, ilmenee havainnollisesti kokeessa, jossa valo kulkee useamman ainekerroksen läpi, ja todetaan säteen suunnan riippumattomuus ainekerroksen sijainnista muiden kerrosten suhteen.

Olisi houkuttelevaa jatkaa pohtimalla erilaisten kvantifiointien perusideoita ja niiden luonteen suhdetta esitettyihin perustyyppeihin. Erityisesti tässä on käynyt ilmi vain viitteellisesti, että suureen kvantifiointi on usein vaiheittainen prosessi. Se myös jatkuu suureen merkitystä *yleistävänä ja rakenteistavana kvantifiointina*. Niitä tarvitaan mm. edettäessä makrosuureista pisteittäisiin ja hetkellisiin suureisiin sekä skalaarisuureista vektori- ja tensorisuureisiin, nelivektoreihin jne. .

Aito, empiirisiin merkityksiin perustuva kvantifiointi on fysiikan käsitteenmuodostuksen erityispiirre. Vaikka muillakin aloilla esiintyy kvantitatiivista tutkimusta, vastaavaa operaatiota, jossa kvantitatiivinen käsite luodaan vertaamalla ominaisuuden asteita ominaisuuden omaan hahmotettuun erityislaatuun nojautuen, ei esiinny muualla. Sen kautta rakentuva, empiirisiin merkityksiin perustuva suurejärjestelmä on ainoa lajiaan. Ominaisuuden asteiden intuitiivisten vertailuperiaatteiden oivalluksilla, joita on tarvittu kvantifiointien perustaksi, on ollut ratkaiseva merkitys fysiikan kehitykselle suureiden määrittelyn alkulähteinä. Tänäkin päivänä niillä on samanlainen merkitys fysiikan käsitteiden ymmärtämisen kannalta. Erityisesti ne paljastavat jotakin olennaista intuition asemasta fysiikassa.

3. KÄSITEHIERARKIAT JA NIIDEN MERKITYS FYSIIKANOPETUKSESSA

3.1 Hierarkiat

Hierarkia on yleinen rakenteellisen järjestyksen muoto. Järjestelmän rakenne on hierarkkinen, kun siinä erottuu eriasteisia tasoja. Hierarkiassa saman tason alkiot mielletään rinnasteisiksi tai samanarvoisiksi ja eri tasojen alkiot eriarvoisiksi siten, että aina toista kahdesta peräkkäisestä tasosta pidetään "ylempänä".

Elämme monenlaisten hierarkkisten järjestelmien keskellä. On *luonnon hierarkioita*, *hierarkkisia toiminnallisia organisaatioita* ja *kulttuurihierarkioita*.

Luonnon hierarkiat. Maailmankaikkeuden aine on järjestynyt olioiden rakenteisuuden asteen mukaiseksi hierarkkiseksi ketjuksi¹¹. Tässä kaiken kattavassa *olioiden rakennehierarkiassa* kunkin tason oliot rakentuvat edellisen alemman tason olioista ja ovat itse seuraavan ylemmän tason rakenneosia. Ketjun alapäässä ovat kvarkit ja leptonit ja yläpäässä galaksijoukot ja ehkä vieläkin suuremmat galaksijoukkojen ryhmät.

Elollisessa luonnossa nähdään vastaavanlainen *eliöiden rakennehierarkia*. Eläin- ja kasviyksilöt rakentuvat elimistä, elimet ehkä tietyistä osista, osat soluista. Soluilla on oma rakenteensa, ja solun rakenneosat lopulta koostuvat molekyyleistä. Ekologiset ja sosiaaliset rakenteet voidaan ymmärtää tämän hierarkian jatkeena kohti hierarkkisesti ylempiä tasoja. Ihmiset muodostavat perheitä, perheet sukuja, ehkä heimoja, kansoja, "sukulaiskansojen ryhmiä". Ihmiskunta voidaan rinnastaa eri eläinlajien muodostamiin yhteisöihin, nämä yhdessä muodostavat eläinkunnan, jolla on vastaava "sosiaalinen" rakennehierarkia jne.

Aineellisen maailman *rakentumisperiaatteen* voidaan nähdä perustuvan *vuorovaikutusten hierarkkiseen ketjuun*. Tässä *ilmiöiden hierarkiassa* vuorovaikutuksen voimakkuusasteet toimivat hierarkiaa luovana periaatteena¹². Olioiden yksilöityminen kullakin tasolla edellyttää niiden rakenneosien välisiä sisäisiä vuorovaikutuksia, jotka ovat olennaisesti voimakkaampia kuin saman tason olioiden ulkoiset vuorovaikutukset, jotka puolestaan toimivat seuraavan tason rakenteen sisäisinä vuorovaikutuksina.

Myös eliöhierarkioiden voidaan nähdä perustuvan vuorovaikutuksiin niiden rakennetta muodostavana tai ylläpitävänä tekijänä. Perheenjäsenten siteet ovat voimakkaampia kuin perheiden väliset jne. Nähdessään tilhiparven Suomen talvipäivässä, sardelli- tai mehiläisparven television luonto-ohjelmassa ei voi välttyä ajattelemasta, että parven yksilöitä sitoo jokin vuorovaikutus.

Hierarkkiset organisaatiot. Yhteiskunnassamme toimii suunnaton joukko erilaisia organisaatioita. On puolustuslaitos, koululaitos, kaupan, tuotannon ja hallinnon laitoksia, kirkko ja muita uskonnollisia yhteisöjä, sosiaalisia organisaatioita, kulttuurin eri alojen järjestöjä, lukematon joukko erilaisia seuroja ja yhdistyksiä jne. Kaikilla mahdollisilla inhimillisen toiminnan alueilla on omia organisaatioitaan. Ne itsessään ovat esimerkkejä ihmisten muodostamista hierarkkisista järjestelmistä, joissa usein on myös ylempiä kansainvälisiä tasoja. Niiden rakenne ja toiminnot ovat hierarkkisesti järjestettyjä. Niiden hierarkkiset suhteet perustuvat kullakin alueella tarkoituksenmukaisiin sovittuihin, päätettyihin tai muuten omaksuttuihin pätevyys- tai valtasuhteisiin.

Kulttuurihierarkiat. Tarkoitan tässä kulttuurilla erityisesti *tiedettä ja taidetta*. Pidän niitä sekä kaikkia niiden lajeja ihmiskunnan prosesseina. Kulttuurihierarkioilla tarkoitan tällöin näiden prosessien luomia tieteen ja taiteen *tuotteiden, metodien ja metodisen tiedon* hierarkioita. Vaikka tarkastelen niitä erityisesti fysiikan näkökulmasta, ainakin suuri osa pohdinnoistani koskee samalla tavalla kaikkia tieteen ja taiteen aloja *mutatis mutandis*.

Tiedettä ja taidetta luovat *kulttuuriset prosessit* ovat *ihmiskunnan yhteisiä* prosesseja. Niiden toteutuminen edellyttää *yksilöiden* luovaa prosessia, joka varsinkin alkuvaiheessa voidaan samastaa oppimiseen. Kulttuurihierarkioiden kuvaa voidaan selkeyttää tieteen ja oppimisen prosessirakenteen mallilla, jonka muodostavat *tieteellinen, teknologinen ja sosiaalinen* prosessi. (Jos taide halutaan kytkeä mukaan, mallia voitaneen täydentää *esteettisellä prosessilla*, jolla on varmasti tärkeä merkitys myös tieteessä.)

Tieteellinen prosessi tavoittelee *ymmärtämistä*, käsitteellistä hallintaa. Se tarkastelee maailmaa "sellaisena kuin se on" ja *rakentaa maailmankuvaa*. Sen toiminta on *hahmottavaa käsitteenmuodostusta*.

¹¹ Ks. esimerkiksi *Galilei 1. Fysiikka luonnontieteenä*. Jari Lavonen, K. K.-S. & Harri Hakulinen Weilin+Göös. 1994. Luku 3.1.

¹² Ibid. Luku 3.2.

Teknologisen prosessin tavoitteena on *hyöty*, maailman kehittäminen ihmisen tarpeita vastaavaksi ja ihmisen käyttäytymisen sopeuttaminen luonnon mahdollisuuksiin. Se pyrkii vaikuttamaan maailmaan ja muuttamaan sitä ja *rakentaa maailmaa*. Sen toiminta on *luonnon tavoitteellista manipulointia*.

Sosiaalinen prosessi tavoittelee *yhteisymmärrystä*. Sen olemukseksi mainitaan usein *neuvottelu merkityksistä*.

Tieteellinen ja teknologinen prosessi kietoutuvat erottamattomasti yhteen. Jälkimmäisen tavoittelemat muutokset vaativat käsitteellistä hallintaa. Havainto- ja koejärjestelyt ovat välttämätöntä luonnon manipulointia, jolla luonto "pakotetaan vastaamaan" käsitteellistä hallintaa tavoitteleviin kysymyksiin. Tieteellinen ja teknologinen prosessi toteutuvat primaaristi yksilöiden tietoisuuden ja luonnon välisessä luovassa prosessissa. Intersubjektivisuuden vaatimuksen vuoksi ne ovat kuitenkin, alistetut *sosiaaliselle prosessille* (ks. johdanto), joka kytkee yksilöiden tietoisuudet yhteiseksi "sosiaaliseksi tietoisuudeksi". Näin oppiminen ja tiede samastuvat, yksilöiden prosessit yhtyvät ihmiskunnan yhteiseksi "suureksi prosessiksi"¹³.

Kukin näistä prosesseista luo omat tuotehierarkiansa. Tieteellinen prosessi rakentaa moninkertaisesti hierarkkista *käsiterakennetta*, jonka joitakin аспекteja on tarkasteltu edellisissä luennoissa. Teknologinen prosessi tuottaa erityisesti *laitteiden hierarkioita*, joista esimerkkinä voidaan ajatella tietokoneita, alkaen elektronisista komponenteista maailmanlaajuisiin verkkoihin, tai mitä tahansa teollista tuotantojärjestelmää.

Kieli on sosiaalisessa prosessissa sekä ensisijainen tuote että pääasiallinen metodinen väline. Kieli, jokainen kieli erikseen ja maailman kielten kokonaisuus, on moninkertaisesti hierarkkinen järjestelmä. Sen rakennehierarkia alkaa äänneistä ja kirjaimista, joista muodostuu sanoja, sanat muodostavat lauseita jne. Kieleen kuuluu myös tieteen ja teknologian hierarkkisen edistyksen mukaisesti kehittyvä terminologia. Kieli seuraa kaikkien kulttuuristen prosessien kehitystä. Siten sosiaalinen prosessi on erottamattomasti mukana tieteellisten ja teknologisten hierarkkioiden rakentamisessa. Ja se toimii ihmisyhteisöjen sosiaalisen hierarkian rakenteissa eri tasojen sisäisinä ja niiden välisinä vuorovaikutuksina.

Prosessit kehittävät samalla omien metodiensa, käsitteenmuodostuksen, luontoon vaikuttamisen ja merkityksistä neuvottelun *metodien* ja niitä koskevan *metodisen tiedon* hierarkkiaan, jolloin prosessit samalla itse ovat hierarkkisen kehityksen alaisia.

3.2 Hierarkkia luovat prosessit

Hierarkkioiden rakentaminen näyttää olevan *sekä luonnon että ihmismielen yleinen pyrkimys*. Tämä toteamus vaikuttaa viattomalta ja ilmeiseltä, mutta sanaan "pyrkimys" sisältyy "tulenarka" ajatus: hierarkian syntymiseen tarvitaan tavoitteellinen prosessi. Hierarkkia luovat prosessit käynnistyvät ja toimivat tavoitteittensa ajamina. Hierarkkiset järjestelmät syntyvät ja kehittyvät tavoitteiden toteutumina. Näin tämä toteamus avaa suuret kysymykset luonnossa ja ihmismielellä vaikuttavien organisoivien periaatteiden luonteesta, *kausalisuuden ja teleologian*, luonnonlakien, sattuman ja tahdonalaisen ohjauksen tai toiminnan suhteesta, jopa vapaan tahdon ongelman – ja viettelee taas eksymään kauas varsinaisen aiheen ulkopuolelle. Rinnastaessaan luonnon ja ihmismielen, se viittaa myös suureen kysymykseen todellisuuden ja mielen suhteesta.

Ihmisen hierarkkiset organisaatiot ovat selvästi tahdonalaisten tavoitteellisten prosessien tuotetta. Ne on suunniteltu lähtien tiettyjen toimintojen tarkoituksenmukaisen ja tehokkaan järjestelyn tavoitteesta, ne on tietoisesti perustettu suunnitelmien mukaisesti ja niitä kehitetään toimintojen tehostamiseksi. Niiden lähtökohtana on jonkun tai joidenkuiden *organisoiva tahto* – tietenkin ne ovat usein myös joidenkin yksilöiden tai yhteisöjen tahdon vastaisiakin. Niillä on *konkreettinen tavoite*, ja prosessi toteutuu *äärellisenä projektina*. Kun organisaatio on pystytetty, tavoite on saavutettu. Hierarkkia luova prosessi jatkuu vain marginaalisesti organisaation kehitystoimintana.

Käsitteiden, kielten, laitteistojen, metodien ja metodisen tiedon *kulttuurisia hierarkioita* luovat kulttuuriset prosessit ovat ilmeisen tavoitteellisia. Ne *samastuvat tavoitteisiinsa*. Ne syntyvät tavoitteistaan ja ne ovat jatkuvaa, päättymätöntä pyrkimystä kohti näitä tavoitteita. Tavoitteet voidaan siten ymmärtää prosessien määritelmiksi. Ne eivät enää ole yksilöiden tai ryhmien tavoitteita, vaan ne ovat ihmiskunnan yhteisiä henkisiä ja kulttuurisia tavoitteita. Ne ovat ihmisen pyrkimyksille suuntaa antavia saavuttamattomia tavoitteita, joten niiden ylläpitämät prosessitkin ovat päättymättömiä¹⁴.

¹³ K. Kurki-Suonio. *Suuren prosessin paradigma*. Dimensio 60. 3/96.

¹⁴ Vrt. K. Kurki-Suonio: *Tuotteet ja prosessit*. Arkhimedes 2/2005, 21 - 25.

Epäilemättä nämä tavoitteet ovat tietoisia, vaikka niiden luonne onkin suuressa määrin intuitiivinen. Ja kulttuurihierarkiat ovat tulosta suunnattomasta määrästä ihmisten tahdonalaisia toimintoja. Kuitenkin tieteen, teknologian ja taiteen etenemisen suunnat antavat usein aiheen kysyä, ovatko nämä prosessit todella täysin ihmisen tietoisessa hallinnassa, vai seuraako tieteen, teknologian ja taiteen kehitys joitakin ihmisen tahdosta riippumattomia lakeja, joita toteutamme vain näennäisesti oman tahtomme varassa. Miten ymmärrämme samojen oivallusten syntyminen eri puolilla maailmaa yhtäaikaan toisistaan riippumatta ja luonteeltaan rinnasteisten virtausten viriämisen samaan aikaan tieteen ja taiteen eri aloilla¹⁵? Mikä synnyttää vaikutelmat tieteen etenemisestä "vastavirtaan" ja ihmisestä teknologian orjana? Jos kulttuurihierarkioiden kehitys on omalakisista, ovatko lait kausaalisia, jostakin alkusyystä johtuvia, vai teleologisia, tavoitteellisia? Jos ne ovat teleologisia, mitä suunnitelmaa, tahtoa ja ohjausta ne toteuttavat?

Luonnon hierarkioista tieteellä on ehdoton kanta. Tieteen paradigma pitää kiinni siitä uskomuksesta, että luonto rakentuu hierarkkiseksi omien kausaalilakiensa mukaisesti. Tieteen metodi ei salli vaihtoehtoja. Älykkään suunnittelun hypoteesi ei mahdu luonnontieteen kuvioihin. Fysiikan koko käsitteellinen kehitys rakentuu syysuhteiden mielikuvien, kausaalimallien, varaan tavalla, jota olen tarkastellut edellisissä luennoissa.

Maailmankaikkeuden kehittymistä ja järjestymistä eriasteisiksi aineellisiksi rakenteiksi tarkastellaan tieteessä prosessina, jonka eri vaiheita uskomme ymmärtävämmme asteittain yhä paremmin. Fysiikka tarjoaa meille tieteellisiä mielikuvia prosesseista, jotka ovat synnyttäneet aineen rakenneosat, samoin kuin niistä, jotka ovat saaneet aineen ryhmittymään galakseiksi ja tähtijärjestelmiksi. Vuorovaikutukset toimivat näiden omalakisien prosessien organisoivana periaatteena. Niiden lait ovat luonnon prosessien etenemisen metodi. Näemme näiden prosessien jatkuvan ja tuottavan yhä hiukkasten ja aineen eri lajeja, tähti- ja planeettajärjestelmiä.

Tieteen käsityksen mukaan *eliöyksilön*, ihmisenkin, kehitys on kausaalinen prosessi. Kasvuprosessia, jossa solut erikoistuvat jakautuessaan tuottaen erilaiset elimet ja yksilön koko hierarkkisen rakenteen, ohjaa lajispesifinen DNA-molekyylillä – pohjimmiltaan fysikaalisten vuorovaikutusten kausaalisten lakien mukaisesti. *Lajien syntyä* pidetään, ainakin Darwinista alkaen, luonnollisena kehitysprosessina. Sen kausaalista etenemistä kuitenkin ohjaa kaksi tilastollista satunnaisuutta, hiukkastason mutaatiot ja makrotason luonnonvalinta, jotka näin olisivat vastuussa elollisen luonnon koko valtavasta lajien hierarkiasta. Viime aikoina tieteessä on saanut vankan jalansijan koulukunta, joka uskoo vahvasti voivansa selittää myös *tietoisuuden* syntyminen "luonnollisessa", pohjimmiltaan vuorovaikutusten kausaalilakien ohjaamassa, prosessissa.

Käsiteltävän otsikon yhteydessä tuntuu toisaalta luonteelta esittää kysymys mahdollisesta *tietoisuuksien hierarkiasta*, jonka yhtä tasoa ihmisten yksilötietoisuus edustaisi. Kysymys sosiaalisten yhteisöjen hierarkiaa luovien eritasoisten vuorovaikutusten luonteesta sekä aikaisemmat viittaukseni intersubjektiviin intuition alkuperään ja kulttuurin kehityksen omalakisuuuteen johtavat ajatukset helposti pohtimaan eritasoisten sosiaalisten tai jopa ihmisestä riippumattomien tietoisuuksien mahdollisuutta. Joka tapauksessa kautta historiansa ihminen on pitänyt luonnon kaiken kehityksen takana olevaa korkeampaa ohjaavaa ja tavoitteellista tahtoa intuitiivisesti ilmeisenä. Tämä luonnontieteen paradigman ja intersubjektiviin intuition ristiriita ylläpitää suurta dialogia, jonka jatkumista pidän yhtenä ihmiskunnan kulttuurin kantavista voimista¹⁶.

Käsitehierarkiat asettuvat tarkastelemaamme kokonaiskuvaan tieteellisen prosessin tuotteena – unohtamatta teknologisen ja sosiaalisen prosessin välttämätöntä osuutta niiden luomisessa. Käsitteet edustavat intuitiivisen ontologisen vakaumuksemme mukaan aidosti luonnon todellisuutta. Niinpä koemme myös niiden hierarkkisyyden kuuluvan todellisuuden luonteeseen. Käsitteiden syntyprosessi antaa kuitenkin aiheita kysyä yhä uudelleen käsitehierarkioiden suhdetta todellisuuteen. Mikä on käsitehierarkioiden suhde luonnollisiin olioiden ja ilmiöiden, ominaisuuksien ja lakien hierarkioihin? Kuvastavatko ne ontologisen todellisuuden luonnetta, vai ovatko ne pelkästään ihmismielen hahmotuspyrkimyksen luomaa järjestystä? Merkitysten hahmottaminen ja käsitteistäminen ovat järjestäviä prosesseja. Havaitsemamme maailman ymmärtäminen merkitsee järjestyksen hahmottamista havainnoissa. Sen tähden on luonnollista, että käsitteet muodostavat hierarkkisia rakenteita. Mutta missä määrin tämä järjestys on hahmotettua, ihmismielen luomaa, ymmärtämisen tavoitteen vaatimaa ja mielen rakenteen mahdollisuuksien sanelemaa järjestystä, missä määrin se on aitoa luonnon järjestystä? Näin päädyimme taas mielen ja todellisuuden suhteen ratkeamattomaan ongelmaan.

¹⁵ Vrt. Bronowski, J.: *Ihmisen vaiheet*. suom. Antero Manninen. Kirjayhtymä. Helsinki (1988).
Alkuteos: *The Ascent of Man*. BBC, London (1973).

¹⁶ Vrt. K. Kurki-Suonio: *Kristinusko ja luonnontieteellinen maailmankuva*. Kirjassa "Opettaja tulevaisuuteen kasvattaja", toim. Esko Kähkönen ja Markku Pyysiäinen. Kirjapaja, Helsinki, 1986.

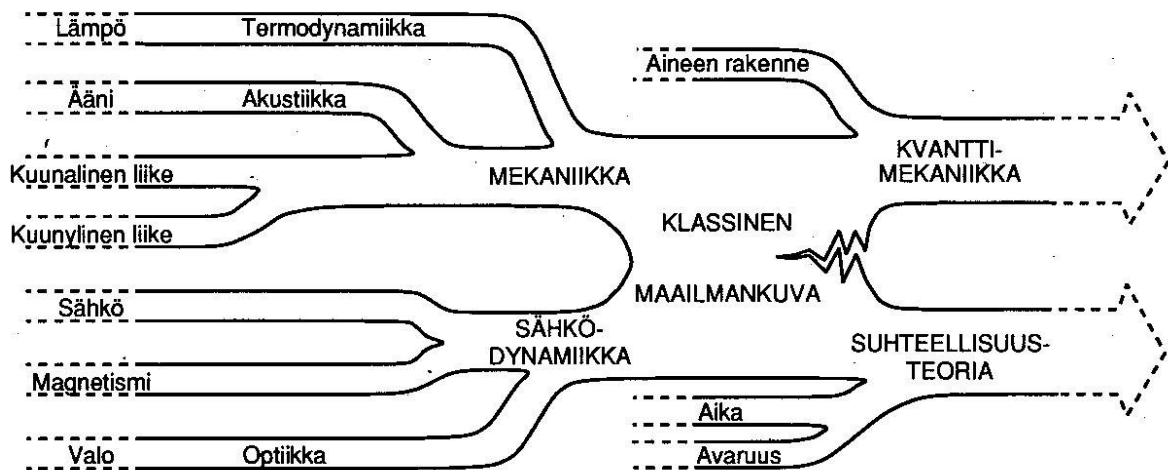
Erilaiset käsittehierarkiat näyttävät olevan tässä suhteessa eri asemassa. Esimerkiksi jonkin ominaisuuden asteeseen perustuvat luokittelut, joita esiintyy esimerkiksi kvantifointiin tähtäävissä operaatioissa (vrt. edellinen luento), ovat esimerkkejä sellaisten yksinkertaisten hierarkkisten rakenteiden luomisesta, jotka ovat ilmeisen tulkinnanvaraisia ja vain käsitteellisen jäsentämisen tarpeesta tehtyjä. Toisaalta taas käsitteistöt, jotka esittävät olioiden rakennehierarkiaa ja niitä luovaa fysikaalisten vuorovaikutusten hierarkiaa, on helppo mieltää todellisuutta aidosti kuvaavaksi. Kuitenkin modernin fysiikan aiheuttama konkreettisen todellisuuskuvan mureneminen, jota on tarkasteltu kirjamme¹⁷ luvussa 5.2.2, liittyy tähänkin suuren kysymysmerkin.

3.3 Käsittehierarkian kaksi ulottuvuutta

Ymmärtämisen tavoitteessa, joka synnyttää tieteellisen prosessin ja ylläpitää sitä, erottuu kaksi vallitsevaa peruselementtiä, jotka kumpikin omalla tavallaan toimivat käsittehierarkiaa generoivina periaatteina. Näin fysiikan käsiterakenteesta tulee kaksiulotteinen¹⁸.

Ymmärtämisen tavoite johtaa primaaristi **yleistyshierarkiaan**. Kirjamme luvussa 2.3.2 tästä on kirjoitettu seuraavasti: "Ymmärtäminen merkitsee luonnonilmiöiden yhä laajempien ja yleisempien rakenteellisten hahmojen tunnistamista ja niiden esittämistä asteittain yhä yleisemmillä käsitteillä." ... "Yksittäiset tapahtumat ymmärretään, kun ne hahmottuvat saman ilmiön eri ilmenemismuodoiksi. Ilmiöt ja niiden empiiriset lait ymmärretään, kun monia ilmiöitä tutkimalla löydetään yleisempiä ilmiöitä ja lakeja, joiden erityistapauksia ne ovat. Riippumattomat ilmiöt tunnistetaan yhä yleisempien ilmiöiden erilaisiksi toteutumiksi erilaisissa tilanteissa. Perusilmiöt, -oliot ja -lait ovat hyvin yleisiä hahmoja, joiden erityistapauksina suuri joukko erilaisia ilmiöitä ymmärretään." ... "Näin käsitteistäminen palvelee jatkuvasti yleistyvää rakenteellista hahmotusta. ... "Fysiikka ei tarjoa lopullisia selityksiä vaan johtaa yhä yleisempien ja syvällisempien selitysten hierarkkiseen ketjuun."

Kirja tarkastelee myös yksityiskohtaisemmin yhdentymiskehitystä, jota hierarkkisesti yleistyvä käsitteistö esittää, ja havainnollistaa sitä kolmella kaaviolla. Kuva 3.1 on niistä ensimmäisen (kirjan kuva 2.7.) pelkistetty versio, yleiskuva yleistyshierarkian muodostumisesta klassisella kaudella. Kirjan viimeisessä luvussa, "Yhtenäistyvää maailmankuva", siihen palataan ja esitetään tarkemmin sähkön, magnetismin ja valon yhdentymiskehityksen pääpiirteet (kirjan kuva 5.8) ja jatketaan kaaviota modernin fysiikan alueelle (kirjan kuva 5.9).



Kuva 3.1 Yleistyshierarkian kehityksen pääpiirteet fysiikan klassisella kaudella.

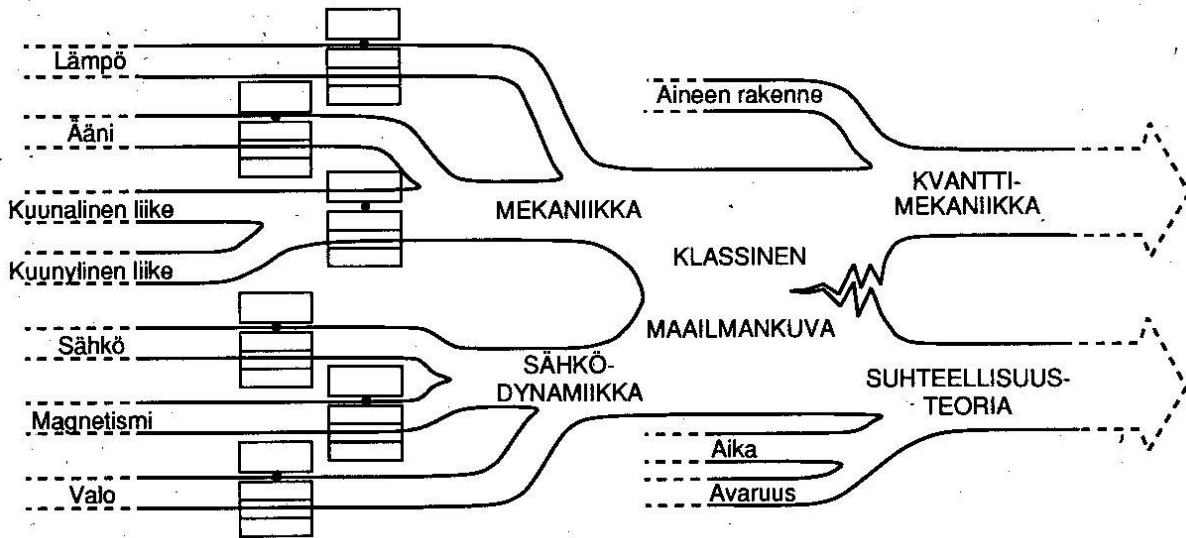
Käsittehierarkian toisen ulottuvuuden virittää *täsmentämisen tavoite*. Se luo **kvantifointihierarkiaa**, jonka syntymistä ja rakennetta tarkasteltiin ensimmäisessä luennossa (ks. kuvat 1.1 ja 1.2).

Nämä kaksi hierarkiaa luovaa periaatetta kytkeytyvät kiinteästi yhteen. Kvantifointihierarkian kvalitatiivisen ja kvantitatiivisen tason muodostama kaksijakoinen perusrakenne, samoin kuin näiden tasojen toisiaan vastaavat kolmijaot, toistuu jokaisen ilmiöalueen ja yksittäisen ilmiön käsitteenmuodostuksessa. Suureet, lait ja teoriat rakentuvat hahmotetuille ominaisuuksille, ominaisuuksien riippuvuuksille ja kausaalimalleille. Fysiikan kehityksestä nähdään, miten kvantifointihierarkia on luonut mahdollisuuksia ja on ollut välttämättömänä

¹⁷ Kaarle ja Riitta Kurki-Suonio: *Fysiikan merkitykset ja rakenteet*. Limes ry., Helsinki, 1994.

¹⁸ Vrt. Irma Hannula: *Need and possibilities of astronomy teaching in the Finnish comprehensive school*. Report series in physics HU-P-D124. University of Helsinki. 2005. Chapter 5.2.3.

edellytyksenä yhdentymiskehityksen etenemiselle. Alemman tason yksittäisten ilmiöiden kvantitatiiviset käsitteistöt ovat toimineet osana sitä *kvalitatiivista* hahmotusperustaa, jolle mielikuva ilmiöiden yhdentymisestä yleisemmäksi ilmiöksi on rakentunut. Samalla tämä eteneminen projisioituu kvantifiointihierarkian kaikille tasoille niin, että yleistyshierarkia näkyy ei ainoastaan ilmiöiden hierarkiana vaan myös suureiden, lakien ja teorioiden hierarkkisina yleistyminä, jotka koskevat yleisempiä ilmiöitä. Kuva 3.2 on yritys kuvata tätä kahden hierarkiaa luovan periaatteen kytkeytymistä. Kvantifiointihierarkiaa esittävän minikaavion pitäisi siinä oikeastaan olla erikseen jokaisessa haarassa sekä ennen että jälkeen haarojen yhtymisen.



Kuva 3.2 Yleistys ja kvantifiointi yhdessä rakentavat kaksiulotteista käsittehierarkiaa

3.4 Käsittehierarkian suhde luonnon hierarkioihin

Eteneminen käsittehierarkiassa on eri asia kuin eteneminen "luonnon hierarkioissa". Rakenteiden ja vuorovaikutusten hierarkiat voidaan mieltää yhtenäisiksi ketjuiksi, mutta ei ole mitenkään selvää, mistä ketjut alkavat ja mihin päättyvät, ja onko niillä edes alkua ja loppua. Niitä jäsentävä käsitteistö ei kuitenkaan ole alkanut kvarkeista ja leptoneista sen paremmin kuin galaksijoukoista, eikä opetuksenkaan ole luontevaa alkaa niistä. Käsitteenmuodostuksen ja oppimisen prosessit alkavat ihmisen havaintomaailmasta ja elinympäristöstä, oman suuruusluokan olioista ja ilmiöistä ja laajenevat siitä asteittain. *Käsittehierarkian kehitys alkaa luonnon hierarkioiden keskeltä, ja se etenee niissä kumpaankin suuntaan.*

Tämä näkyy yhdentymiskehityksen kaavioista, jotka esittävät ilmiöiden käsitteellisen hallinnan kehitystä. Koko klassisen kauden käsitteistö kuvassa 3.1 koskee ensisijassa ihmisen oman suuruusluokan ilmiöitä. Modernin fysiikan aikaansaama maailmankuvan murros jakaa etenemisen kahteen suuntaan, kohti aineen rakennetta ja kohti kosmista mittakaavaa. Vasta kaavion jatko modernin fysiikan kaudelle (kirjan kuva 5.9) paljastaa, että ilmiöiden käsittehierarkia edelleen rakentuessaan pelkistyy sen vuorovaikutushierarkian esitykseksi, jonka ymmärrämme olevan aineellisen maailman olioiden rakennehierarkian perustana.

Luokittelu on perusoperaatio, josta hierarkkinen käsitteenmuodostus alkaa. Se on aina hierarkkisen järjestyksen hahmottamista ja sen käsitteellistä esittämistä. Jo siinä keskeltä alkamisen periaate on ilmeinen. Tarkasteltavien olioiden, ilmiöiden jne. luokat muodostuvat rinnasteisiksi hahmottuvista olioista, ilmiöistä jne. Keskenään rinnasteiset luokat ovat hierarkian ylemmän tason elementtejä. Luokkia voidaan edelleen ryhmitellä ja rakentaa näin seuraavaa ylempää luokitustasoa. Luokan sisällä taas voidaan luokitteluperustetta tarkentaa ja jakaa luokkia alemman tason aliluokiksi.

Ajatellaan vaikka jokapäiväisen ympäristön esineiden hahmottumista lapsen maailmassa. Esimerkiksi tuolit, pöydät ja vuoteet opitaan tuntemaan tuoleina, pöytinä ja vuoteina, ennen kuin yleisempi huonekalun käsite ymmärretään ja ennen niitä opitaan luokittelemaan tarkemmin esimerkiksi rakenteen ja käyttötavan mukaan. Vie aikansa ennen kuin lapsi on valmis ymmärtämään "kappaleen" yleisenä olioluokkana, joka kattaa kaikki kodin ja ympäristön esineet, taivaankappaleet, ihmiset ja eläimet, miten tahansa niitä luokitellaankin, puhumattakaan vielä yleisemmästä "olion" käsitteestä.

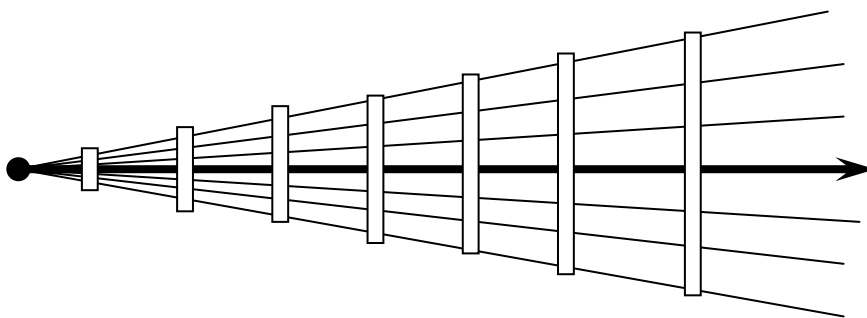
3.5 Oppiminen hierarkkisenä prosessina

Oppiminen itsessään on hierarkkisesti etenevä prosessi, sillä kaikki uuden oppiminen rakentuu aikaisemmin opitulle ja kaikki opittu avaa uusia edellytyksiä prosessin etenemiselle. Se on yksilön kulttuurinen prosessi. Se on ihmisen osallisuutta ihmiskunnan "suureen prosessiin". Oppimisessa voidaan aivan alusta alkaen nähdä kaikkien edellä tarkasteltujen kulttuuristen prosessien idut. Opetuksen tarkoituksena on ohjata näiden itujen kasvamista niin, että oppilaat pääsisivät, kukin omassa prosessissaan mahdollisuuksiensa mukaan, osallisiksi suuren prosessin intersubjektivisista peruselementeistä. Se on siten sekä ohjausta tieteelliseen, teknologiseen, esteettiseen ja sosiaaliseen prosessiin että näissä prosessissa kehittyviin intersubjektivistien tuotteiden, metodien ja metodisen tiedon hierarkioihin.

Näissä hierarkioissa *ylempi taso perustuu alempiin*. Alemman tason elementit ovat ylemmän tason elementtien osia tai muulla tavoin näiden tuottamisen tai syntyminen välttämättömiä edellytyksiä. Sen tähden *alemmat käsitteet*, tiedot, taidot, metodiset valmiudet jne. *on opittava ennen kuin ylemmän tason käsitteiden jne. oppiminen tulee mahdolliseksi*. Oppimisessa kaikki hierarkkisesti etenevät kulttuuriset prosessit alkavat alusta. Opetuksenkin on siis alettava alusta kaikkien hierarkiaa luovien tekijöiden suhteen, ja se on sovittava siihen hierarkkiseen tasoon, jonka oppilas on kulloinkin omassa prosessissaan saavuttanut. Olen huomauttanut, ettei fysiikanopetus voi alkaa atomeista ja kaavoista. Tämä tarkoittaa, että opetuksen on alettava alusta kummankin käsittehierarkiaa generoivan periaatteen osalta¹⁹. Atomit edustavat korkeaa tasoa käsitteiden yleistyshierarkiassa, kaavat kvantifiointihierarkiassa.

Käsitteiden ja metodien hierarkkiset suhteet on tunnettava, jotta oppilaiden tason tunnistaminen olisi mahdollista ja opetus voisi edetä "luonnollisella" tavalla oppilaiden kulloiseenkin tasoon sopeutuen. Tässä on ehkä fysiikanopetuksen suurin haaste. Opettajan kielellinen, käsitteellinen ja metodinen valmius on korkeammalla hierarkkisella tasolla kuin oppilaan. Tämä *hierarkkinen distanssi* on niin suuri, ettei opettaja selviä siitä ilman perusteellista eläytymistä oppilaan tasoon ja tuntematta niitä tämän tason elementtejä, jotka ovat seuraavien tasojen edellytyksiä, vaan sivuuttaa "itsestään selvinä detaljeina" asioita, jotka oppilaan pitäisi itselleen aktiivisesti työstää voidakseen edetä. Voitaneen ajatella, että oppilaan lahjakkuuden yksi tärkeä ulottuvuus on "*distanssin sieto*", kyky ottaa vastaan hierarkkisesti korkeamman tason oppia, jonka hallintaan hänellä ei vielä ole varsinaisia edellytyksiä, ennakoivasti oman prosessinsa vastaista kehitystä ajatellen.

Käsitteenmuodostuksen hierarkkisen kehityksen ja sen prosessirakenteen selvittämisessä sekä oppimisen eri vaiheisiin sopivien opetustapojen etsimisessä, on kaikkien niiden pohdintojen ydin, joita olen fysiikanopettajien opetuksessani markkinoinut "hahmottavan lähestymistavan" nimellä. "Lähestymistapa" ei ehkä ole ollut täysin onnistunut termi, koska lähestymistavoilla tarkoitetaan usein tiettyä opintojen astetta varten suunniteltuja metodisia reseptejä. Itse olen sen sijaan etsinyt sellaista perustaa, joka tekisi mahdolliseksi läpi kaikkien oppimisen vaiheiden johdonmukaisesti etenevän fysiikanopetuksen kehittämisen ottamalla mallia ja oppia käsitteenmuodostuksen prosessirakenteesta sekä sen käsitteistön ja metodien hierarkkisesta kehityksestä.



Kuva 3.3 "Hahmottava lähestymistapa" ja "lähestymistavat".

Kuvan 3.3 tarkoitus on havainnollistaa tätä ajatusta. Oikealle avautuva viuhka symbolisoi oppimisen ja kulttuuristen prosessien hierarkkista kehitystä. Nuolen on tarkoitus edustaa tavoittelevaani "hahmottavan lähestymistavan" ideaa. Ja laajenevat pystypalkit kuvaavat kehityksen eri tasoja, tai vaikkapa luokka-asteita, ja niitä varten tarvittavia tasokohtaisia "lähestymistavan" metodisia reseptejä.

¹⁹ Ibid. Chapter 5.4.