

RAKENTEELLINEN HAHMOTUS

Kaarle Kurki-Suonio

Kurssin esittely

Kurssin otsikko "*Modernin fysiikan empiirinen perusta*" viittaa siihen empiiriseen paktoon, joka vaatii muuttamaan fysiikan klassisia perusmielikuvia. Kurssi on rakennettu hiljattain perustetun *F2k-laboratorion* ympärille. Tähän laboratorioon on koottu modernin fysiikan eräiden avainkokeiden nykyaikaiset demonstraatio- ja oppilastyölaitteistot. Nämä kokeet kuuluvat tieteen ja oppimisen prosessin siihen vaiheeseen, jota voitaisiin sanoa *saapumiseksi modernin fysiikan portille*. Laboratorion tunnuksen F2k eli Fysiikka 2000 pitäisikin oikeastaan olla F1,9k. Kurssilla tarkastellaan näitä kokeita, niiden merkitystä tieteen kehittymiselle sekä ongelmia, jotka on kohdattava opetuksessa ja opiskelussa astuttaessa sisään modernin fysiikan portista.

Tiistain luennoilla "*F2k-laboratorion kokeiden esittely 1 ja 2*" esitellään nämä kokeet ja niiden laitteistot ja tarkastellaan niiden osuutta siinä empiirisessä pakossa, joka vaatii muuttamaan fysiikan klassisia perusmielikuvia. Keskiviikkona ja torstaina iltapäivällä tutustutaan näihin kokeisiin omakohtaisesti käytännössä.

HEIMO SAARIKON maanantain kaksi luentoa asettavat nämä kokeet käsitteenmuodotuksen historialliseen perspektiiviin ja kiinnittävät huomion siihen käsite- ja mielikuvaperustaan, jonka pohjalta näiden kokeiden ideat ja niiden tulkinat syntyivät. Hänen torstaiaamuinen luentonsa "*Valonnopeuden mittaamisen historia*" avartaa modernin fysiikan empiirisen perustan tarkastelua suhteellisuusteorian suuntaan.

Tämän ensimmäisen luennon, "*Rakenteellinen hahmotus*", tarkoitus on tarjota periaatteellista taustaa sille, miten modernin fysiikan portilla kohdattuja ongelmia voidaan tulkita hahmottavan lähestymistavan perusideoiden näkökulmasta. Esittelen siinä lyhyesti hahmottavan lähestymistavan periaatteita sellaisena kuin olen niistä kirjoittanut hiljan ilmestyneessä artikkelissani¹.

Tiistai-iltapäivän ja keskiviikkoamun luentoni "*Käsitteiden merkitykset ja niiden kantajat*." ja "*Modernin fysiikan ontologinen kriisi*" kuuluvat läheisesti yhteen. Tarkastelen niissä yksityiskohtaisemmin klassisten mielikuvien mukaisia "*todellisuuden elementtejä*" ja modernin fysiikan niihin vaatimia muutoksia. Yritän myös valottaa ongelmia, joita tästä seuraa modernin fysiikan opetukselle.

Perjantaiamun luennossani "*Nykyajan Platon ja Aristoteles*" tarkastelen hahmottavaa lähestymistapaa todellisuuskuvan rakentamisen periaatteena vastakohtana sille maailmankuvalle, joka nojautuu "kaiken teoriaan" ja pyrkii selittämään koko havaittavan todellisuuden yhdestä matemaattisesta perusideasta lähtien portaittain etenevien karkeistuksien kautta.

Kurssin päättää KARI ENQVISTIN luento *Mitä ovat luonnon perusvakiot?*, jonka sijoittamisesta tähän rakenteeseen en osaa sanoa mitään.

¹ K. KURKI-SUONIO (2011). *Principles Supporting the Perceptual Teaching of Physics: A "Practical Teaching Philosophy"* Science & Education, 20: 211–243.

Hahmottava lähestymistapa modernissa fysiikassa²

Hahmottavan lähestymistavan mahdollisuutta modernissa fysiikassa on usein kysytty ja kyseenalaistettu. On ajateltu, että siinä kaiken pitäisi lähteä havainnoista ja kokeellisuudesta, mutta modernin fysiikan avainkokeita voidaan koulussa lähestyä enimmäkseen vain kerrotun empirian avulla.

Hahmottavan lähestymistavan perusajatus kiteytyy sen mottoon: "*Merkitykset ovat ensin*", eli ensin syntyy ymmärrys, joka sitten käsitteistetään.

Ymmärtäminen on merkitysten hahmottamista.

Hahmottaminen on intuitiivinen prosessi, ei looginen.

Merkitykset ovat hahmoja, intuitiivisesti muodostuvia mielikuvia ja mielikuvarakenteita.

Käsitteet ovat niiden täsmennettyjä esityksiä, jotka tekevät mahdolliseksi fysiikan kielen, merkityksistä puhuminen. Tämä on käsitteiden kvalitatiivinen taso.

Kysymys on siis siitä, miten empiirisitä merkityksiä voidaan auttaa hahmottamaan niin, että siitä saadaan perusta käsitteenmuodostuksen etenemiselle.

Merkitysten elementit

Puhun empiirisistä merkityksistä, mutta empiria yksin ei luo merkityksiä. Mitään "puhdasta empiriaa" ei edes ole. Yksinkertaisimmista havainnoista alkaen *kaikki empiria on "teoriapitoista"*, samalla tavalla kuin *kaikki teoria* käsitteineen on *"empiirapitoista"* - eli sillä on empiirinen merkitys.

Merkityksissä on aina mukana empiirinen, teoreettinen ja metafyyssinen komponentti:

Merkitysten *teoreettisuus* on niiden rakenteellisuutta, joka muodostuu niiden kytkeytymisestä muihin merkityksiin, sekä niiden käsitteellisiä esityksiä.

Metafyyssiset merkitykset ovat intuitiivisia mielikuvia ja mielikuvarakenteita, joihin ymmärtämisen kokemus perustuu.

Empiirialla, eli havainnoilla ja kokeellisuudella, on kuitenkin ensisijainen asema merkitysten perustana.

Teoreettiset ja metafyyssiset elementit ovat empiirialle alistettuja. Tämän alisteisuuden hyväksyminen oppimisen ja tutkimuksen ohjenuoraksi on *asenteellinen valmius*, joka on kaiken *tieteellisyyden perusta*. Se on myös hahmottavan lähestymisen lähtökohta. Siksi puhun empiirisistä merkityksistä.

Hahmottava lähestymistapa merkitsee metafyyssisten mielikuvien rakentamista empiirian tuella ja sen pakosta ja näiden mielikuvien teoreettisten, käsitteellisten esitysten muodostamista.

Opetuksen lähestymistapa voi olla kokeellinen olematta hahmottava.

Selvä esimerkki on oma ensimmäinen oppikirjaesitykseni massan ja voiman käsitteistä³.

Massa määritellään siinä kokeellisesti vetoamalla standardiseen mittausmenetelmään, punnitukseen, joka on painojen vertailua. Painon yhteys kappaleen hitauteen, joka on massan merkitys Newtonin mekaniikassa, ei kuitenkaan ilmene eikä voikaan ilmetä tässä lähestymistavassa ennen pitkiä teoreettisia tarkasteluja. Voima taas määritellään monien oppikirjaesitysten esimerkin tapaan, tasaisesti kiihtyvän liikkeen empiirisesti todennettavana "rakenteellisenä invarianttina" *ma*. Näin voiman käsite jää leijumaan ilman kiinnitystä mihinkään olioon tai ilmiöön sen havaittavana ominaisuutena. Suomessa BÖRJE EKELUND⁴ on esitellyt yksityiskohtaisesti tällaisen lähestymistavan periaatteen vedoten JEAN PIAGET'n oppimisteoriaan. Hän tuomitsee empiiristä perustaa vailla olevana metafysiikkana sellaiset sanonnat kuin "voima vaikuttaa", joiden avulla perinteisessä opetuksessa on yritetty luoda ymmärrettävää

² Ks. K. KURKI-SUONIO, H. HAKULINEN & J. LAVONEN (2002). *Galilei 8. Opettajan opas*. WSOY. Johdanto. Kirjan A. B. ARONS (1997). *Teaching Introductory Physics*. John Wiley & Sons, New York luku 10 on erinomainen, sen kanssa yhtäpitävä esitys modernin fysiikan opettamisesta.

³ KURKI-SUONIO K., KERVINEN M. & KORPELA R. (1982). *Kvantti 1. Fysiikan laaja oppimäärä, kurssit 1,2,3*. Weilin+Göös.

⁴ B. EKELUND (1977) *Jean Piaget ja fysiikan opetus*. Matemaattisten Aineiden Aikakauskirja 6/41, 281 sekä viitteet siinä.

voiman mielikuvaa. Vaikka juuri tämä sanonta sellaisenaan ei kiinnitäkään voiman käsitettä mihinkään merkityksen kantajaan, mielikuvien kieltäminen ymmärryksen perustana merkitsee selväsanaista irrottautumista hahmottavan lähestymisen periaatteesta. Massan ja voiman käsitteiden hahmottavan lähestymistavan mukainen käsittely on esitetty Galilei-sarjassa⁵.

Toisaalta *lähestymistapa voi olla hahmottava ilman omakohtaista kokeellisuutta tai demonstraatioita*. Tähän joudutaan varsin yleisesti juuri modernissa fysiikassa.

Oppimisprosessin lähtökohtana on *primaariempiria, aistien välityksellä hahmottuva kokemus ympäröivästä todellisuudesta ja meistä itsestämme sen osana*.

Siinä hahmottuvat *"todellisuuden elementit", avaruus, aika, oliot, ilmiöt, olioiden ja ilmiöiden ominaisuudet sekä ominaisuuksien relaatiot, jotka koetaan riippuvuuksiksi, ilmiöiden välisiksi syysuhteiksi*. Nämä kuuluvat merkitysten metafyyssiseen ytimeen. Niistä rakentuvat mielikuvat, jotka koetaan havaintojen ymmärtämiseksi.

Luentojeni pääteemana ovat kysymykset:

Millaisia nämä mielikuvat ovat klassisessa fysiikassa?

Miten ja miksi niitä on pakko muuttaa astuttaessa sisään modernin fysiikan portista.

Hahmottamisen dynamiikka

Hahmottuminen tapahtuu *mielen ja luonnon vuorovaikutuksessa*. Sen "dynamiikkaa" tarkasteltaessa *ihmismieli ja luonto* voidaan mieltää perinteisen dualismin mukaisesti kahdeksi eri osapuoleksi, vaikka ne ovatkin erottamattomasti yhteen kietoutuneet. Kuten aina, vuorovaikutus on newtonilaisittain molemminpuolista.

Luonto vaikuttaa mieleen empirian välityksellä. Havainnot, kvalitatiiviset ja kvantitatiiviset kokeet ja kokeelliset tutkimukset muokkaavat mielen rakennetta luomalla empiirisiä hahmoja, mielikuvia ja mielikuvarakenteita. Me koemme niiden vastaavan luonnon omia elementtejä ja rakenteita tavalla, jonka koemme luonnon ymmärtämiseksi.

Ihmismieli taas vaikuttaa luontoon ihmisen toimintojen välityksellä. Ihminen muokkaa luonnon olioiden ja ilmiöiden ominaisuuksia ja rakentelee uusia olioita ja ilmiöitä.

Kutsun näitä vastakkaissuuntaisia vaikutuksia tieteelliseksi ja teknologiseksi prosessiksi. *Tieteellinen prosessi* tavoittelee luonnon ymmärtämistä. *Teknologinen prosessi* pyrkii mielen asettamien tavoitteiden mukaiseen luonnon kehittämiseen. Ne voidaan tulkita Newtonin kolmannen lain tarjoaman analogian mukaisesti toistensa vastavoimiksi samalla, kun ne ovat saman kokonaisuuden erottamattomia osia – kuten voima ja vastavoimakin.

Tässä vuorovaikutuksessa ihmismieli on kuitenkin ainoa aktiivinen osapuoli. Empiria, ensimmäisten aistimusten muodostumisesta alkaen, on *luonnolta kysymistä*, ihmismielen hahmotuskyvyn mukaisten rakenteiden etsintää, niiden sovittamista toisiinsa ja jo olevaan mielen rakenteeseen. Tähän kuuluu pyrkimys hahmottaa *"puhtaita ilmiöitä"*, jotka voitaisiin alistaa yksitellen kokeellisesti tutkittaviksi niiden lakien selvittämiseksi. Tämä on olennaista tieteen *reduktionismissa*. Luonnon kaoottinen ilmiömaailma, jossa kaikki kytkeytyy kaikkkeen, pyritään purkamaan joukoksi puhtaita ilmiöitä, joiden lakien tunteminen tarjoaisi perustan myös niistä yhteen punoutuvan kaoottisen kokonaisuuden ymmärtämiselle.

Fysiikan opetuksessa hyvin varhainen esimerkki on liikkeen lajien hahmotus: puhtaan etene-
misen, puhtaan pyörimisen ja puhtaan värähtelyn tunnistaminen kappaleen paikan, asennon
ja muodon muutoksiksi ja erilaisten todellisten liikkeiden ymmärtäminen näiden yhdistelminä.
Esimerkiksi 400 m:n juoksussa urheilija kohtaa pahan ongelman, jos häneltä vaaditaan vain
etenemisliikettä, kun takasuoralla pitäisi tällöin juosta takaperin. Jousen varassa riippuvan
kappaleen liikkeen kutsuminen värähtelyksi on varsin yleinen hämäys. Kappalehan on siinä

⁵ J. LAVONEN, K. KURKI-SUONIO & H. HAKULINEN (1995). *Galilei 3. Mekaniikka 1*. Weilin+Göös.

Tarkemmin ks. K. & R. KURKI-SUONIO (1994): *The Concept of Force in the Perceptual Approach*. H. Silfverberg and K. Seinälä (eds.): Ainedidaktiikan teorian ja käytännön kohtaaminen. Matematiikan ja luonnontieteiden opetuksen tutkimuspäivät 24.–25.09.93. Reports from the Department of Teacher Education in Tampere. University of Tampere. A18/1994, 321–334.

vain edestakaisessa etenemisliikkeessä. Jousen liike taas on värähtelyn ja edestakaisen etenemisen yhdistelmä, jonka hahmottaminen vaatii turvautumista massakeskipisteen käsitteeseen. Yllättävän usein kohtaa sellaisia omituisia lauseita kuin "Maa pyörii Auringon ympäri, jotka sekoittavat pyörimisen kiertoliikkeeseen eli etenemiseen kiertoradalla.

Kokeellisessa tutkimuksessa luonnolta kysytään "puhtaita ilmiöitä" koskevia kysymyksiä. Tämä sopii hyvin myös koulussa tehtävien demonstraatioiden ja laboratoriokokeiden motivaatioksi, kun opiskelijoiden mielestä tarkastellaan ilmiöitä, joita ei luonnossa esiinny. Luonto on pakotettava vastaamaan. Ei se vastaa vapaaehtoisesti. Jos sitä vain käy kuuntelemaan, se puhuu puuta heinää. Luonto on saatava toteuttamaan mahdollisimman puhtaana juuri se ilmiö, jota halutaan tutkia, ja tavalla, joka kohdistaa luonnolle täsmällisen tätä ilmiötä koskevan kysymyksen. Kokeellisuuteen tarvitaan aina luonnon manipulointia, teknologista prosessia, joka muokkaa olosuhteita siten, että puhdasta ilmiötä häiritsevät tekijät saadaan minimoiduksi.

Muistan esimerkkinä omilta mekaniikan luennoiltani tilanteen, jossa tutkittiin vierimistä kaltevalla tasolla. ARI HÄMÄLÄINEN oli avustamassa, kuten niin usein niihin aikoihin. Vierivä kappale vain ei pysynyt alustallaan, vaan lipsahteli välillä sivuun. Eturivin opiskelijaneitonon puhkesi silloin puhumaan: "Näin siis fysiikka toimii, koetta toistetaan kunnes saadaan toivottu tulos!" Hän oli sekä oikeassa, että väärässä. Koetta toistetaan niin kauan, että luonto suostuu toteuttamaan tutkittavan ilmiön. Mutta, kun luonto sen toteuttaa, sen antama vastaus kokeen asettamaan kysymykseen hyväksytään.

Hahmottaminen oppimisessa ja tieteessä ei kuitenkaan ole yksilön prosessi. Mielen välinen vuorovaikutus yhdistää yksilöiden mielet "tiedeyhteisön" tai "oppimisyhteisön" yhteiseksi *sosiaalseksi mieleksi*. Hahmottaminen tieteessä ja oppimisessa on tämän sosiaalisen mielen, ei yksittäisten mielen, vuorovaikutusta luonnon kanssa. Tieteellinen ja teknologinen prosessi "uivat" *sosiaalisessa prosessissa*, jota voidaan luonnehtia *neuvotteluna merkityksistä*. Kummassakin niin hyvin hahmotettavat merkitykset ja niiden käsitteistämisen kuin menettelytavat niiden tavoittamiseksi ovat sosiaalisen prosessin alaisia. Siten hahmot ja ymmärtäminen, joista puhun ovat yhteisiä, *intersubjektiivisia*, eivät subjektiivisia. Tämä tuo ne niin lähelle *objektiivisuutta* ideaa kuin on ylimalkaan mahdollista.

Rakennehierarkia

Hahmojen primaarinen rakenteellisuus. Hahmotus ei ole koskaan mikään yksinkertainen kertatapahtuma. Tarvitaan toistuvia aistimuksia ja kaikkien aistien osallistumista, ennen kuin kaiken tämän mielletty yhteensopivuus luo hahmon. Pienten lasten tarkkailu paljastaa selvästi, miten kokonaisvaltaista toimintaa ympäristön hahmottaminen on. Kaikki aistit ovat käytössä, maku- ja hajuaistia myöten. Tunto- ja liikeaistit ovat aivan keskeisessä asemassa. Tarvitaan kaikkien aistien yhteistoimintaa, ilmiöiden itse tuottamista ja omaa osallistumista ilmiöihin. On helppo vakuuttua siitä, että alusta alkaen tieteellisen ja teknologisen prosessin idut ovat erottamattomasti mukana "hahmottamisen dynamiikassa".

Hahmot syntyvät aina suhteessa muihin hahmoihin. Olioiden, ilmiöiden ja ominaisuuksien hahmot syntyvät yhteen kytkeytyneinä.

Oliion hahmoon kuuluvat sen ominaisuudet ja käyttäytyminen ja sen suhteet muihin olioihin. Se hahmotetaan ominaisuuksiensa kokonaisuutena, johon kuuluvat myös sen vaikutukset ja käyttömahdollisuudet. Kivi on kivi, koska se on kova, se on jonkin värinen, kokoinen ja muotoinen ja koska sen voi nostaa pudottaa tai heittää, siihen voi kompastua ja sillä voi rikkoa ikkunan, ja koska on muita kiviä, joista voi rakennella jne.

Ilmiö hahmotetaan siihen osallistuvien olioiden ja niiden ominaisuuksien välisten riippuvuuksien kokonaisuuksina.

Ominaisuudet hahmotetaan joidenkin olioiden tai ilmiöiden ominaisuuksina.

Valmiit hahmot ja empiirinen pakko. Hahmon muodostuminen perustuu havaintojen yhteensopivuuteen. Kun tämä koetaan riittäväksi hahmo on valmis. Se koetaan havaintojen ymmärtämiseksi ja siitä tulee pysyvä osa mielen rakennetta ja edelleen hahmottamisen "perusmateriaalia". Samalla sen perustana oleva yhteensopivien havaintojen joukko koetaan "empiiriseksi pakoksi", joka oikeuttaa hahmon pitämisen aidosti todellisuuteen kuuluvana elementtinä. *Empiirinen pakko* on siis sekin intuitiivinen kokemus. Se liittyy väistämättä hahmottamiseen.

Havaintojeni yhteensopivuus tuottaa minulle täysin riittävän empiirisen pakon hyväksyä tämä kynä kädessäni aidosti olevaksi kirjoitusvälineeksi, tämä luentosali tämänhetkisen olemassaoloni paikaksi, teidän jokaisen läsnäolonne tässä salissa olevina itsenäisinä olioina, joilla on tunnistettavat yksilölliset ominaisuudet.

Kumuloituminen ja kerroksellisuus. Hahmotetut merkitykset ja niitä esittävät käsitteet muodostavat mieleen kertyvän rakenteen, joka on hyvin kestävä. Näin siis mielellä, vuorovaihtuksen aktiivisella osapuolella, on kumuloituva rakenne, joka kokonaisuudessaan toimii edelleen hahmottamisen perustana. Käsitteellinen ymmärrys kertyy näin tavalla, joka voidaan rinnastaa orgaaniseen kasvun periaatteeseen. Yksinkertaisimmillaan se merkitsee, että kasvamisen nopeus on verrannollinen organismin kokoon, josta seuraa eksponentiaalinen kasvun laki. Omaksuttu merkitysten rakenne toimii uuden hahmotuksen perusmateriaalina. Tästä seuraa käsiterakenteen hierarkkinen kerroksellisuus, jossa ylemmän kerroksen käsitteet ovat alempien rakenteellisia hahmoja.

Tätä tarkoittaa otsikon "*rakenteellinen hahmotus*".

Käsitteet prosesseina

Merkitysten portaittainen kehitys. "Valmiita hahmoja" ei kuitenkaan voi koskaan pitää lopullisina. Merkitysten kehittyminen ja sitä seuraava käsitteenmuodostus on *päättymätön prosessi*, kuten ARONSKIN korostaa: "*Students should be made explicitly aware of the process of redefinition that goes on continually ...*". "Valmiit hahmot" ovat prosessin *välietappeja*. Ne ovat tietyllä "soveltuvuusalueella" empiirisesti päteviä ja sisäisesti konsistentteja, mutta vain tämän alueen hahmottamisen kannalta "lopullisia". Kunkin merkityksen kehitys jatkuu ja johtaa asteittain uusiin välietappeihin. Esimerkkeinä voidaan ajatella vaikka energian ja massan käsitteiden kehittymistä.

Käsitehierarkian generaattorit. Tässä merkitysten ja käsitteiden kehitysprosessissa voidaan erottaa *hierarkian kaksi generaattoria*: Yleistämisen ja täsmentämisen tavoitteet.

Yleistys on keskeinen ymmärtämisen väline. Yksittäiset tapahtumat ymmärretään saman ilmiön eri esiintymisinä. Ilmiöt ymmärretään tietyn ilmiölajin erityistapauksina ja ilmiölajit jonkin yleisemmän ilmiöluokan erilaisina toteutumina. Tämä on johtanut fysiikan yleistyshäilykseen, asteittain yhä yleisempiin uusiin hahmotettuihin merkityksiin, jotka koetaan syvenevien "*selitysten*" ketjuksi.

Täsmentämisen tavoite ilmenee *kvantifiointina*, ominaisuuksien muuntamisena mitattaviksi suureiksi. Standardin määritelmän mukaankin *suureet ovat mitattavia ominaisuuksia*.⁶ Tämä on fysiikan opetuksen avainkysymys. Kaikki mittaaminen on suureiden mittaamista, lait ovat suureiden välisiä riippuvuuksia, ja suureet ovat kaikkien teorioiden peruselementtejä. Ellei suureiden merkitys olioiden ja ilmiöiden ominaisuuksina ole hahmottunut, ei ole mitään edellytyksiä ymmärtää sen paremmin kokeellista kuin teoreettistakaan fysiikkaa. Siksi yksi oman fysiikan opettajien koulutukseni avaintehtäviä on ollut eri suureisiin sovellettu kysymys: "minkä oliion tai ilmiön, mikä ominaisuus?". Ja yllättäviä ongelmia on aina kohdattu.

⁶ Ks. esim. K. KURKI-SUONIO (2011). *Kansainvälisen suurestandardin uudistus* Dimensio 2/75, 41–45.

*Kvantifiointi ei luo uusia merkityksiä. Siinä merkitykset säilyvät. Ne vain välittyvät kvantitatiivisilta käsitteiltä, ominaisuuksilta ja riippuvuuksilta vastaavien kvantitatiivisten käsitteiden, suureiden ja lakien merkityksiksi. Tässä korostuu se perusoivallus, että *ymmärtäminen on luonteeltaan kvantitatiivista*. Kvantifiointi liittyy siihen kuitenkin uuden ja tärkeän, määrällisen näkökulman. Hahmotukseen kytkeytyy *suuruusluokkien taju!**

Suuruusluokkien tajun puute merkinä hahmotuksen keskeneräisyydestä, on jäänyt vahvasti mieleeni monista lukemistani harjoitus- ja koetehtävien käsittelyistä. Klassinen esimerkki on kuulantyöntöä koskenut fysiikan valintakoetehtävä, jossa vastaukseksi tarjottiin kuulun lähtönopeuksia muutama mm/s:stä moninkertaiseen äänennopeuteen. Jos nopeuden käsitteen merkitys olikin hahmotettu, suuruusluokkien taju oli jäänyt siihen liitämättä.

Generaattorien kytkeytyminen. Kvantifioinnilla on kuitenkin ratkaiseva merkitys yleistävän hahmotuksen jatkumiselle. Yleistyskehityksen etenevä rakenteellinen hahmotus käyttää perusaineistonaan jo omaksuttua, mielen rakenteeseen liittynyttä kvantitatiivista käsiterakennetta, joka on näin osoittautunut välttämättömäksi, yleisemmälle kvantitatiivisen ymmärtämisen kehitykselle.

Modernin fysiikan perusvaiheet tarjoavat tästä erinomaisia esimerkkejä. Kemiaalisia reaktioita koskevilla kvantitatiivisilla laeilla oli ratkaiseva merkitys DALTONILLE ja AVOGADROLLE atomi- ja molekyylikäsitteiden hahmotuksen perustana. Samoin FARADAYN elektrolyysilait tarjosivat perustan ionisoitumisen idealle ja lähtökohdan rakenteellisten mielikuvien muodostamiselle atomeista. Myös jokainen esiteltävistä F2k -laboratorion kokeista johtaa oman kvantitatiivisen hahmottavan merkityksensä ohella kvantitatiivisiin tuloksiin, joilla oli ratkaiseva merkitys etenevän rakenteellisen hahmotuksen perusaineistona.

Yleistyskehitys koskee vastavuoroisesti samalla tavalla kaikkia kvantitatiivisen käsitteiden tasoja. Se johtaa väistämättä suureiden yleistäviin kvantifiointeihin sekä lakien ja teorioiden uusiin, laajemmilla ilmiöalueilla päteviin muotoihin.

Modernin fysiikan portilla

Oppimisen ja tieteen tulkitseminen hierarkkisesti rakentuvaksi hahmotusprosessiksi laajentaa ja rakenteistaa hahmottamisen käsitettä suunnattomasti tavalla, jota olen kuvannut alussa mainitussa artikkelissani. Fysiikan käsitteenmuodostuksen kaikki tasot voidaan tulkita hahmotusprosessin vaiheiksi. Nykyaikainen tiede ja teknologia kasvavat tieteellisestä ja teknologisesta prosessista niiden äärimmäisinä kehitysvaiheina, ja hahmottamisen dynamiikasta rakentuu tieteen metodinen sykli.

Modernin fysiikan portilla ollaan jo hyvin pitkällä tässä prosessissa. Lujasti mielikuvarakenteeseen kiinnittyneet *klassisen fysiikan mielikuvat ovat välietappeja esittämiensä merkitysten kehityspolulla*. Ne ovat omalla alueellaan empiirisen pakon luomia valmiita hahmoja. Astuttaessa sisään portista uusi kokeellisuus vaatii niiden korjaamista. Tarvitaan uuden kerroksen rakenteellista hahmotusta, joka edellyttää suuren mittakaavan rakenteellista empiriaa luomaan "empiirinen pakko" uusien "valmiiden hahmojen" kokemukseen.