

Dimensio 60 1/96. 14 - 20.

NELJÄ KESKIPAKOVOIMAA¹

Kaarle Kurki-Suonio
Fysiikan laitos, Helsingin yliopisto

Tiivistelmä

Keskipakovoiman käyttöä ja käyttökelpoisuutta tarkastellaan empiirisen käsitteenmuodostuksen yleisten periaatteiden valossa. Niiden mielikuvien perusteella, joita kuvaamaan käsitettä käytetään, erotetaan keskipakovoiman neljä eri merkitystä. Näistä kolmella on tai on ollut tieteellinen merkitys, neljäs on syntynyt opetuskäytäntöjen kautta. Käsitteen käytössä korostuu yleiskielen ja terminologian rinnakkaiskäytön ongelma. Sen erilaisten käyttötapojen sopivuutta fysiikan opetukseen voidaan arvioida sillä perusteella, miten ne auttavat hahmottamaan yleistä ja yhtenäistä kuvaa liikeilmiöistä.

Käsitteiden merkitykset

Käsitteillä jäsenämme ympäristöä. Käsitteet yhdistävät yksittäisiä tapauksia yleisemmiksi kokonaisuuksiksi. Käsitteet yhdentyvät ja yleistyvät yleisemmiksi kattokäsitteiksi ja muodostavat näin hierarkkisesti syvenevän ymmärtämisen ketjun. Mitä yleisempi käsite, sitä hyödyllisempää on sen merkityksen ymmärtäminen. Näin etenee tiede, näin etenee oppiminen [4, 5, 6, 8: 2.3 ja 3.2].

Oppiminen on olennaisesti sama prosessi kuin tiede. Tämä on *suuren prosessin paradigma*. Oppiminen on jokaisen yksilön oma henkilökohtainen prosessi, kun tiede on koko ihmiskunnan yhteinen ainutkertainen tiedon ja ymmärtämisen luomisen prosessi. Mutta tieteessäkin vain yksilö voi ymmärtää. Yksilön hahmotuskyky on sekä oppimisessa että tieteessä se perusta, josta kaikki käsitteenmuodostus alkaa.

Käsitteet ovat merkitystensä formaalisia esityksiä. Merkitykset ovat havaintoihin ja jo opittuun käsitteistöön perustuvia mielikuvia. Ne syntyvät hahmottamalla erikseen jokaisen yksilön mielessä mielikuvien ja havainnon, teorian ja empirian, erottamattomassa vuorovaikutuksessa.

Käsitteitä ei voi kieltää. Mielikuvia, olivatpa ne meidän mielestämme miten väärä tahansa, ei voi eikä saa torjua, sillä ne ovat kaiken ymmärtämisen ainoa mahdollinen perusta. Jokainen, niin tutkija, opettaja kuin oppilaskin nojautuu omiin mielikuviansa. Mutta mielikuvat eivät saa jähmettyä muuttumattomaksi rakenteeksi. Vain syvenemiseen pyrkivä ymmärtäminen on ymmärtämistä. Oppiminen on, samoin kuin tutkimus, mielikuvien jatkuvaa kehittämistä. Opetuksen perustehtävä on auttaa opiskelijaa prosessoimaan mielikuviaan, estää niiden jäätyminen [10: luku 3].

Jokaisella on oikeus kuvata mielikuviaan kielellisesti parhaan käsityskykynsä mukaan. Eihän muuta mahdollisuutta ole. Jokainen pyrkii käsitteistämään mielikuviaan käyttämällä sanoja, jotka mahdollisimman hyvin vastaavat hänen omia mielikuviaan. Opiskelussa ja tieteessä tästä oikeudesta tulee velvollisuus, sillä molemmat ovat pyrkimystä kohti yhteistä ymmärtämistä. Yhteisesti ymmärrettyjä mielikuvia voidaan rakentaa vain sosiaalisen prosessin avulla. Termit ovat näiden "tieteellisten" mielikuvien sovittuja kielellisiä esityksiä. Näin syntyy terminologia. Terminologia luonnollisesti kehittyy ja muuttuu sitä mukaa kuin yhteinen ymmärryskin. Jotkin käsitteet ja termit syrjäytyvät kokonaan, toiset säilyvät ja saavat uusia merkityksiä.

On suorastaan hämmentävää huomata, miten hyvin yksilön oppimisen prosessi toistaa tieteen historiaa. Näyttää siltä, että ihmismielellä on sille ominainen rakenne, joka ohjaa mielikuvien muodostumista. Opiskelijoiden mielikuvat kehittyvät tieteen historiasta tuttuja reittejä, eksyvät samoilta harharetkille ja päätyvät samoihin umpiperiin, mutta niitä voidaan myös auttaa edistymään samalla tavalla kuin tieteelliset käsitykset ovat edistyneet. Uusi ymmärrys voi rakentua vain aikaisemman pohjalle. Historialliset kehitysvaiheet osoittautuvat välttämättömäksi yksilön oppimisen välivaiheina. On ilmeistä, ettei kvanttimekaniikkaan ja suhteellisuusteoriaan ole oikotietä. Mutta Newtonin oivalluksiinkin on pitkä polku, joka kulkee niitä edeltävien mielikuvarakenteiden kautta.

¹ Kirjoitus perustuu MAOLin syyspäivillä 14.10.1995 pidettyyn luento.

Keskipako- eli sentrifugaalivoimaa voidaan tarkastella näiden yleisten periaatteiden valossa. Sanana se kuvaa hyvin eräitä jokapäiväisen kokemuksen synnyttämiä hahmoja. Juuri siksi se on aikanaan fysiikan historiassa syntynyt tieteellisenä käsitteenä, ja siksi se on myös halukkaasti omaksuttu yleiskieleen. Vaikka sen merkitys fysiikan terminä on muuttunut, sillä on jatkuvasti varsin runsas yleiskielinen käyttö, joka vastaa sen tieteellisen syntyhistorian ensimmäisiä merkityksiä.

Keskipakovoima on monella tapaa hyvä ja käyttökelpoinen käsite. Ongelma on sen moninaiskäyttö erilaisissa merkityksissä, joita tässä esityksessä erotetaan neljä erilaista ja joista vain yksi voi olla terminologinen. Vastaava ongelma toki kohdataan aina, kun samaa sanaa käytetään sekä yleiskielessä että terminä. Fysiikassa on runsaasti esimerkkejä sekä yleiskielisen sanan omaksumisesta termiksi että termiksi luodun sanan siirtymisestä yleiskieleen, mitä keskipakovoima edustaa. Kummassakin tapauksessa opetuksen on kiinnitettävä huomiota terminologisen käytön erottamiseen yleiskielisistä [8: luku 3.1].

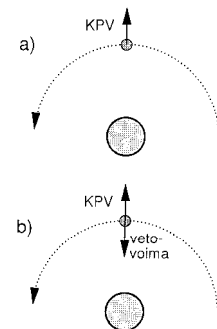
Keskipakovoiman, kuten muidenkin käsitteiden, käyttöä ja käyttökelpoisuutta on arvioitava sen merkitysten valossa. Tällöin huomio on kiinnitettävä sekä niihin mielikuviin, joita sen avulla havainnollistetaan, että mielikuviin, joita sana kielellisen merkityksensä vuoksi herättää. Niitä voidaan peilata käsitteen terminologisen käytön historiallisiin vaiheisiin, ja niitä voidaan arvioida fysiikan ymmärrystä luovan yleistysprosessin kannalta. Tällöin joutuu väistämättä samalla tavalla arvioitavaksi myös keskipakovoiman käsitteellinen lähiympäristö, käsitteet, joita on käytetty tai käytetään samoissa yhteyksissä.

Aristoteleesta Newtoniin - ensimmäisen keskipakovoiman nousu ja tuho

Aristoteelinen voima oli kappaleen voimaa. Kappaleet putoavat itsestään. Liike alaspäin on niiden luonnollista liikettä. Ne tahtovat alas. Ne voivat pysyä ylhäällä vain niin kauan kuin niillä on liikkeen antamaa voimaa. Maata kiertävät taivaankappaleet saavat tämän voiman kiertoliikkeestään.

Ensimmäinen keskipakovoima on aristoteelinen voima, joka kappaleella on liikkeensä vuoksi ja joka estää sen luonnollisen liikkeen alas.

Kun Newton esitti, että Aurinko vetää planeettoja ja Maa Kuuta, keskipakovoiman tehtäväksi tuli tämän vetovoiman kumoaminen. Kääntäen vetovoima estää keskipakovoimaa heittäjästä planeettoja ja Kuuta pois radoiltaan.



Kuva 1. Ensimmäinen keskipakovoima
a) ennen Newtonia, b) Newtonin jälkeen.

Tätä merkitystä tyypillisimmillään edustaa liikenneopetuksen keskipakovoima, joka suistaa tai pyrkii suistamaan auton kaarteessa tieltä [14]. Ensimmäinen keskipakovoima piileskelee myös sitaatissa [1: s. 238]: "*Auringon massa hallitsee vetovoimallaan planeettaa ja pitää sen tietyllä radalla, vaikka planeetta muiden voimien vaikutuksesta pyrkii sinkoutumaan avaruuteen.*"

Tosin sitaatti puhuu häveliäästi "muista voimista" ja sen perusmielikuvakin on epämääräinen, koska se ei edes yritä sanoa, mistä nämä aiheutuvat. Ajatus on kuitenkin ilmeinen, Auringon vetovoiman ja "muiden voimien" tasapaino, jonka ansiosta planeetta pysyy radallaan. Sama mielikuva välittyy myös yksityistermistä RPE eli *radallapysymisehto*, jota eräät oppikirjat käyttävät dynamiikan peruslain erityisnimenä tasaisen ympyräliikkeen yhteydessä.

Newtonin vallankumouksen ydin on sen mielikuvien uudessa rakenteessa. Aristoteelisessa ajattelussa mekaniikan ilmiöissä oli kaksi osapuolta kappale, olio, joka liikkuu, ja liike, ilmiö, joka kappaleelle tapahtuu. Voima oli kappaleen omaa voimaa, joka merkitsi sen kykyä vaikuttaa liikkeeseensä.

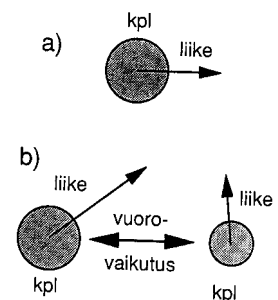
Newton irrotti voiman kappaleesta liittämällä ilmiöiden perusmielikuvaan kolmannen osapuolen, vuorovaikutuksen. Olion ja tarkasteltavan ilmiön lisäksi mukaan tulee erillinen syyilmiö, vuorovaikutus. Voimasta tulee sen voimakkuutta esittävä suure [7, 8: luku 3.3.3].

Newtonin mekaniikan ydinajatus voidaan kiteyttää mielikuvaan: Vain vuorovaikutukset voivat muuttaa kappaleiden liiketilajoja. Kun vuorovaikutuksia ei ole, kappale on *vapaa*. Vapaan kappaleen liiketila ei muutu. Näin kolmannen osapuolen mukaantulo johtaa jatkavuuden lain ideaan.

Tämän, mekaniikan ensimmäisen kulmakiven, merkitystä hämärtää suomalaisessa koulufysiikassa käytetty termi, *vapaakappalekuva*. Käsitteellä tarkoitetaan tiettyä ratkaisuteknistä apuvälinettä tehtävissä, joiden tilanteessa kappaleet ovat kaikkea muuta kuin vapaat. Apuväline on hyvä, mutta sen hämäävä nimitys olisi syytä vaihtaa parempaan.

Oppikirjan väite, jonka mukaan painovoimakentässä vapaasti putoavaa kappaletta voidaan pitää "eristettynä" [11: s. 18], torjuu Newtonin ensimmäisenkin oivalluksen, erityisesti, kun sitä selvennetään vähän myöhemmin [11: s. 23]: "Kun kappaleeseen kohdistuu ulkoisia voimia, jotka muuttavat sen liiketilaa, systeemi ei ole eristetty." Asia ei siitä muutu, että mekaniikan perustermi "vapaa" on korvattu lämpöopin termillä "eristetty". Siispä opetetaan, että putoava kappale on "vapaa" eli putoaminen on kappaleen "luonnollista liikettä", johon ei voimaa tarvita. Keskipakovoiman osalta ajatus vie näin takaisin ensimmäiseen aristoteeliseen merkitykseen voimana, joka estää kappaleen luonnollisen liikkeen.

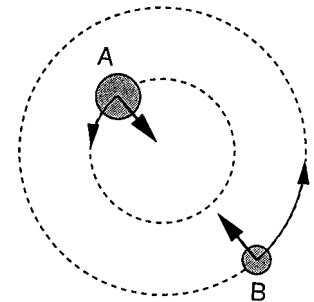
Newtonin mekaniikan käsitteiden merkitykset voidaan ymmärtää vain sen mielikuvarakenteen kautta, jota ne esittävät. Sen mukaisessa perustilanteessa on kaksi kappaletta, joiden välillä on yksi vuorovaikutus, kummankin kappaleen liiketilain muutosten yhteinen syy. Yhden kappaleen liike on aristoteelinen lähtökohta, josta ratkaiseva kolmas osapuoli on eliminoitu.



Kuva 2. Mekaniikan perushahmotus
a) Aristoteleen, b) Newtonin mukaan.

Tarkasteltaessa yhden kappaleen liikettä pitkin ympyrärataa, vuorovaikutuksen merkitys jää epäselväksi, ja tilanteen ensimmäinen luonteva hahmotus johtaa aristoteeliseen käsitteistöön. Siksi kaikki tavalliset ympyräliikkeen esimerkit, kivi langan varassa, lapsi karusellissa, auto kaarteissa jne., ovat tilanteita, joissa ensimmäinen keskipakovoima yhä uudelleen reinkarnoituu.

Ympyräliikkeen perusesimerkinä pitäisi käyttää vaikkapa kaksoistähteä, jotka kiertävät tahdissa pitkin ympyrä ratoja. Tähtien liikkeiden yhteisenä keskipisteenä on systeemin massakeskipiste. Tähtien kiihtyvyydet suuntautuvat tähän pisteeseen ja aiheutuvat dynamiikan peruslain mukaisesti tähtien gravitaatiovuorovaikutuksesta. Tähtiin vaikuttaa yhtä suuret vastakkaisuuntaiset voimat, jotka ovat tähtien yhdysjanan suuntaiset ja suuntautuvat siten kohti tällä janalla olevaa ratojen yhteistä keskipistettä. Ne ovat siis keskeisvoimia.



Kuva 3. Ympyräliikkeen
newtonilainen perusesimerkki.

Opetuksen ongelmana on perustilanteen kokeellinen toteuttaminen. Kaksoistähteä ei voi tuoda luokkaan muuten kuin kuvina tai simulaatioina. Sen sijaan esimerkiksi langalla yhteen kytkettyjen kappaleiden liikettä liukkaalla alustalla tai heitettyinä voidaan kyllä tutkia. Jos näiden tilanteiden oivaltaminen mekaniikan perustilanteiksi olisi ilmeistä, ei mekaniikan käsitteiden luomiseen olisi tarvittu neroa, eikä aristoteelinen ajattelu olisi niin sitkeässä.

Perustilanteessa ei ole keskipakovoimalle sopivaa roolia. Tämä johtuu voiman merkityksen muuttumisesta. Ensimmäinen keskipakovoima oli kappaleen voimaa. Newtonin mekaniikassa kappaleella ei ole voimaa vaan hitaus, joka ilmenee sen pyrkimyksenä kulkea suoraan ja tasaisesti ja samalla sen kykyä vastustaa liiketilain muutoksia, myös liikesuunnan muuttamista. Ensimmäisen keskipakovoiman hahmo säilyy mutta saa uuden tulkinnan. "Keskipakovoima", joka suistaa kaarteissa auton tieltä, onkin auton oma hitaus, joka saa auton kulkemaan suoraan, kun kitkavuorovaikutus tien kanssa katkeaa [4].

Keskipakovoiman nimitys sopii varsin hyvin kuvaamaan tätä merkitystä. Ilmaiseehan sen kieliasu varsin selvästi, että kysymys on kappaleen omasta pyrkimyksestä paeta pois päin keskuksesta. Tarinan murhaaja on pikemminkin Newtonin aikaisessa polemiikissa syntynyt vastakäsite, *keskihakuvoima*. Sehän ei sanana lainkaan

vastaa newtonilaista, kappaleeseen ulkopuolelta vaikuttavan voiman mielikuvaa, vaan pitää kiinni "kappaleen voimasta" antaen ymmärtää, että kappale itse pyrkii hakeutumaan kohti keskusta sen sijaan, että se pyrkii sieltä pakoon [4]. Näin se vääntää Auringon ja Maan vaikutukset planeettaan ja Kuuhun näiden omiksi pyrkimykseksi ja pönkittää sitä historiallista mielikuvaa, että kappaleilla on luonnollinen halu alas.

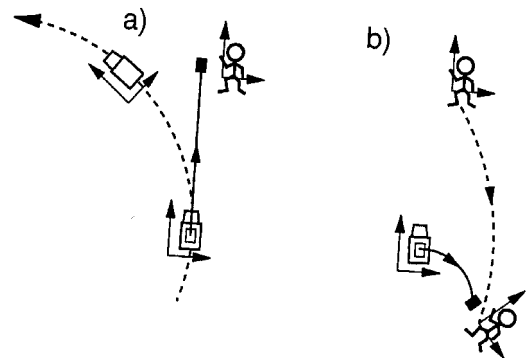
Aidot ja näennäiset voimat - toinen keskipakovoima.

Dynamiikan peruslain mukaan kappaleeseen vaikuttava voima määrää kappaleen kiihtyvyyden. Vastaavasti kappaleen kiihtyvyys ilmaisee siihen vaikuttavan voiman. Tämä ajattelu pätee sillä nimenomaisella ehdolla, että jatkavuuden laki on voimassa.

Kiihtyvässä tai pyörivässä koordinaatistossa jatkavuuden laki ei päde. Vapaatkin kappaleet ovat kiihtyvässä liikkeessä. Ulkopuolinen havaitsija toteaa nämä kiihtyvyydet näennäisiksi, mutta koordinaatiston asukas joutuu jakamaan kiihtyvyyttä aiheuttavat voimat newtonilaisiin ja aristoteelisiin voimiin. Edelliset aiheutuvat tunnistettavista vuorovaikutuksista. Jälkimmäiset näyttävät kappaleen voimilta, ja ulkopuolinen havaitsija tietää ne näennäisiksi, koordinaatiston liikkeestä johtuviksi [3]. Jotta kappale pysyisi paikallaan, se on tuettava voimalla, joka estää kappaleen noudattamasta hitautensa vaatimusta ja pakottaa sen seuraamaan koordinaatiston liikettä. Koordinaatiston asukas tulkitsee tilanteen newtonilaisen ja aristoteelisen voiman tasapainoksi. Kun newtonilainen sivistys leviää koordinaatistoon, aristoteelisiä voimia aletaan kutsua hitausvoimiksi.

Pyörivän maapallon asukas voi tarkasti mittaamalla havaita, etteivät kappaleet noudata jatkavuuden lakia eivätkä dynamiikan peruslakia. Kappaleilla on Maan pyörimisen vuoksi Maan akseliin suuntautuva kiihtyvyys, ekvaattorilla 34 mm/s^2 . Hitautensa vuoksi jokainen kappale on keskipakovoiman verran, ekvaattorilla 0,34 %, "aitoa painoaan" kevyempi. Tämä koskee tietysti myös jokaista Maahan itseensä kuuluvaa osaa. Tästä syystä Maa on "levinyt" akselista pois päin niin, että sen ekvaattorisäde on pitempi kuin napasäde.

Laukun irtoaminen kaarteessa auton katolta on pyörivässä koordinaatistossaan ajavan autoilijan kannalta ihan kunnollinen keskipakoilmiö [14]. Laukun vuorovaikutus auton kanssa katkeaa, kun se ei riitä kumoamaan laukun keskipakovoimaa. Laukku lähtee tällöin jälkimmäisen vuoksi auton suhteen suoraan ulospäin ja kaartaa pudotessaan taaksepäin toisen näennäisen voiman, Coriolis-voiman vuoksi. Tarkkaavainen jalankulkija näkee sen lähtevän auton nopeuden suuntaan ja putoavan normaaliin tapaan pystytasossa.



Kuva 4. Laukku putoaa:
a) Jalankulkijan, b) autoilijan näkemys.

Tämä on *toinen keskipakovoima*, merkitys, jonka Newtonin mekaniikka käsitteelle perustellusti antaa [9: luku 8.1.3]. Se on koordinaatiston liikkeestä johtuva näennäinen voima, näennäinen siksi, ettei se johdu vuorovaikutuksista. Se on erityistapaus hitausvoimista, jotka aiheutuvat kappaleen hitaudesta ja koordinaatiston liikkeestä. Yksinään se esiintyy vain silloin, kun koordinaatisto pyörii tasaisesti ja kappale on siinä paikallaan. Käsitteen käyttökelpoisuus perustuu siihen, että likimäärin tasainen pyörimisliike on verrattain yleistä. Yleisemmässä tapauksessa hitausvoima jakautuu laskennallisesti eri syistä johtuviin osuuksiin. Tällöin keskipakovoima on se osuus, joka riippuu vain koordinaatiston kulmanopeudesta ja kappaleen paikasta koordinaatistossa, kun esimerkiksi coriolisvoimaa esittää termi, joka riippuu koordinaatiston kulmanopeudesta ja kappaleen nopeudesta koordinaatiston suhteen. Käytännön tilanteissa havaitaan vain, että kappaleen liike koordinaatiston suhteen poikkeaa dynamiikan peruslain mukaisesta liikkeestä tavalla tai toisella.

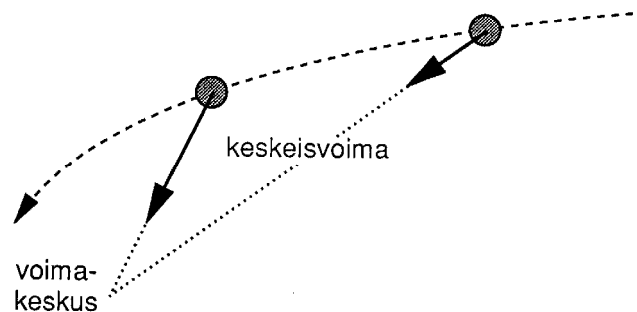
Kuinka kappale liikkuu itsensä suhteen - kolmas keskipakovoima

Millaisia ovat luonnonlait, jos mielivaltaisen kappaleen tulkitaan olevan levossa? D'Alembertin ongelman syvällisyys ei ole koulussa helposti lähestyttävissä. On toki mahdollista siirtää dynamiikan peruslaissa termit samalle puolelle, kirjoittaa $F - ma = 0$, ja tokaista, että siinä hitausvoima $-ma$ tasapainottaa kappaleeseen vaikuttavat aidot voimat. Ilman d'Alembertin maailmankuvallista ongelmaa tämä on kuitenkin pelkkä merkityksetön laskutemppu.

Kun ideaa sovelletaan tasaisessa ympyräliikkeessä olevaan kappaleeseen, syntyy *kolmas keskipakovoima*. Liiketylöstä tulee RPE tai oikeastaan PPE eli paikallaanpysymisehto mielettömästi viuhkovassa maailmankaikkeudessa. Mutta koulun laskennallisessa käytännössä se on vain tuhkasta noussut ensimmäinen keskipakovoima, voima, jonka kappaleen oman koordinaatiston kiihtyvyys kappaleelle antaa ja joka kumoaa kappaleeseen vaikuttavat aidot voimat.

Monet keskipakoilijat puolustavat käsitteen tällaista käyttöä selittämällä, että se on tässä oikean eli toisen keskipakovoiman erityistapaus. Kappaleen liikettä tarkastellaan tällöin kappaleen mukana liikkuvassa koordinaatistossa eli kappaleen itsensä suhteen. Niinpä niin, näinhän d'Alembertkin pohti, mutta miten oppilas ymmärtää tällaisen "liikeprobleeman"? Miten kappale liikkuu, kun se liikkuu itsensä suhteen? Eikö se ole harakan ampumista tykillä, kun kappaleen liikkeen tutkimisen lähtökohdaksi otetaan koko maailmankaikkeuden probleema. Miksi ylimalkaan halutaan hävittää Newtonin mekaniikan perusajatus kappaleen liikkeen ennustamisesta dynamiikan peruslain ja ulkoisten vuorovaikutusten lakien perusteella, liikeytälön idea.

Käytännössä keskipakovoiman tällainen käyttö jakaa etenemisliikkeet kolmeen luokkaan: (1) suoraviivaiset liikkeet, (2) tasaiset ympyräliikkeet, (3) muut. Tämä on hauska jako, sillä kaksi ensimmäistä luokkaa ovat tyhjiä joukkoja, koska ne ovat matemaattisia malleja ja kaikki todelliset etenemisliikkeet kuuluvat kolmanteen luokkaan. Ensimmäistä luokkaa opitaan käsittelemään dynamiikan peruslain avulla, toista luokkaa keskipakovoiman ja RPE:n avulla. Ellei todellisia liikkeitä kokonaan unohdeta, niiden käsittely jakautuu kahteen osaan, joista toinen noudattaa dynamiikan peruslakia, toinen tottelee keskipakovoimaa ja RPE:tä [4]. Vauhdin ja suunnan muutokset jäävät erillisiksi käsitteiksi, voiman ja kiihtyvyyden luonnollinen yleistys vektorisuureiksi torjutaan. Hukkaan meni Newtonin idean $F = ma$ kaunis yksinkertaisuus, joka kytkee yhteen mekaniikan kolme perushahmoa (kuva 2b) samalla tavalla riippumatta liikkeen luonteesta.



Kuva 5. Arvoitus: Mihin keskipakovoima suuntautuu keskeisliikkeessä?

Tekohengitystä väärään päähän - neljäs keskipakovoima

"Aloitteleva fysiikan opettaja" esittää [13], että keskipakovoima onkin "ympyräliikkeen keskipisteeseen vaikuttava voima". Hän ihastelee jonkun muinaisen oppikirjantekijän suurenmoista oivallusta, jota hän pitää sekä terveän maalaisjärjen että Newtonin mekaniikan mukaisena, ja ihmettelee "mikä on tuonut keskipakovoiman kummittelemaan ympyräliikettä suorittavan kappaleen tuntumaan."

Ajatus esiintyy lukemattomissa vanhoissa ja uusissa kansantajuistelevissä sepustuksissa. Tyypillinen esimerkki on oppikirjasitaatti [12: s. 19]: "*Langan päässä kiertävä kivi aiheuttaa pojan kädessä selvästi tuntuva keskipakovoiman ...*" Sen ytimenä on pyrkimys löytää keskipakovoimaksi newtonilainen aito voima. Tämä *neljäs keskipakovoima* on eräänlainen hengenpelastusyritys, jolla yritetään estää rakkaan lapsen hukkuminen Newtonin vallankumouksessa. Koska tasaisessa ympyräliikkeessä olevan kappaleen kiihtyvyyden aiheuttaa keskipisteeseen suunnattu voima, pelastusrenkaaksi heitetään voiman ja vastavoiman laki arvellen, että "keskihakuisen" voiman yhtä suuri mutta vastakkaisuuntainen vastavoima olisi "keskipakoinen".

Ajatus näyttää luontevalta tarkasteltaessa langan päässä pyöritettävää kiveä, mutta siihen kätkeytyy kaksi perusvirhettä:

(1) *Myös vastavoima on "keskihakuinen"*. Tämä on ilmeistä ympyräliikkeen newtonilaisessa perustilanteessa (kuva 3). Periaatteessa tilanne ei muutu, tulipa toinen kappale miten suureksi tahansa, vaikka kappaleiden ratojen yhteinen keskipiste saadaankin näin mielivaltaisen lähelle suuremman kappaleen massakeskipistettä. Aittoa "keskipakoista" voimaa ei siis esiinny edes langan päässä pyöritettävän kiven tapauksessa. Puhe radan keskipisteeseen vaikuttavasta voimasta taas on puhdasta mystiikka. Voimat vaikuttavat kappaleisiin eivätkä tyhjässä lilluviin pisteisiin.

(2) *Yleensä tällaista vastavoimaa ei ole*. Useimmissa keskipakovoiman perusesimerkeissä "keskihakuinen" voima on usean voiman summa. Kallistetussa kaarteessa ajavaan autoon vaikuttaa Maa painovoimalla, tie kitkalla ja tukivoimalla. Nämä yhdessä antavat autolle sen kiihtyvyyden. Kullakin niistä on oma vastavoimensa. Vastavoimia on siis kolme, joista yksi vaikuttaa maapalloon, kaksi tien pintaan. Yksikään niistä ei vaikuta "radan keskipisteeseen", eikä niitä voi laskea yhteenkään, koska ne vaikuttavat eri kappaleisiin.

Neljännän keskipakovoiman tapaisen käsitteen tarve on vähintäänkin kyseenalainen. Mihin tarvitaan kappaleen liikkeen tarkastelussa voimaa, joka vaikuttaa jonnekin muualle kuin kappaleeseen itseensä? Oppikirjasitaatin [12: s. 19] jatko on paljastava: "*Samanlainen keskipakovoima syntyy planeetan kiertäessä radallaan. Tämä voima voittaa Auringon vetovoiman ja planeetta pysyy radallaan.*" Tämä on silmänkääntötempu. Sanotaan "samanlainen keskipakovoima", mutta yritetään vaihtaa tulkintaa kenenkään huomaamatta. Keskipakovoimaa ei yritetäkään sijoittaa minnekään, ei ainakaan Aurinkoon, joka vastaisi pojan kättä. Sanotaan vain ylimalkaisesti, että se "voittaa Auringon vetovoiman". Tämähän on mahdollista vain jos se vaikuttaa samaan kappaleeseen kuin Auringon vetovoima, mutta silloinhan se on oikeaoppisen aristoteelinen ensimmäinen keskipakovoima.

Sama hämäysyritys toistuu säännöllisesti puolustuksen puheenvuoroissa. Ensin näytellään viisas "hand-waving" neljännän keskipakovoiman idean puolesta, mutta sovellettaessa käsitettä esimerkiksi karuselliin se kuitenkin piirretään vaikuttamaan lapsen ja lasketaan yhteen muiden häneen vaikuttavien voimien kanssa [3].

Neljäs keskipakovoima on taitamattomien havainnollistussyritysten harhapolku ja umpiperä. Se esittää luontevasti kiven pyörittämiseen liittyvää kokemusta - mutta ei mitään muuta. Kai fysiikassa on muutakin tärkeää kuin kiven pyörittäminen. Sillä ei ole mitään yhteyttä keskipakovoiman käsitteen alkuperään. Fysiikan historian tuntemissa merkityksissä keskipakovoima ei ainoastaan häily aavemaisesti "kappaleen tuntumassa", vaan se on nimenomaan liikkuvan kappaleen omaa voimaa.

Hengenpelastussyritys on sekä kummallinen että tarpeeton. Hukkunuthan elää ja on saanut itselleen hyvän ja soveltuvan viran uudessakin hallintomallissa. Kun Newton irrotti voiman kappaleesta ja liitti sen vuorovaikutukseen, keskipakovoima jäi henkiin näennäisenä voimana. Sen alkuperä on edelleenkin kappaleessa itsessään, sen hitaudessa.

Neljännän keskipakovoiman keksijä voi olla ylpeä keksintönsä menestyksestä samalla tavalla kuin tietokonevirusten tekijät ylpeilevät saavutuksillaan. Kesällä kohtasin tämän viruksen tiedekeskus Heurekan syventävässä kansiossa, josta monet opinhaluiset abiturientit ovat sen ilmeisesti napanneet oppimisensa esteeksi ja ylioppilastutkintolautakunnan kummasteltavaksi [2].

Viitteet

[1] Ahola E., Anttila A., Similä K. & Timonen E. *Elinympäristöni* 5 - 6, s. 238. Kunnallispaino 1979.

[2] Arminen E. Yksityinen keskustelu 14.10.1995.

[3] Kurki-Suonio K. *Aidot ja näennäiset voimat*. Dimensio **52**, 3/1988, s. 52.

[4] Kurki-Suonio K. *Pakanallinen keskipakovoima*. Dimensio **52**, 7/1988, s. 38.

[5] Kurki-Suonio K. & Kurki-Suonio R. *Tutkimuksen ja oppimisen perusprosessit*. Dimensio **55**, 5/1991, s. 18.

- [6] Kurki-Suonio K. & Kurki-Suonio R. *Empiirinen käsitteenmuodostus fysiikassa*. Artikkelikirjassa: Tieteen teitä. toim. Agnes Airola, Urho Ketvel, K. V. Laurikainen, Simo Liukkonen ja Jussi Rastas. Yliopistopaino. Helsinki 1992, s. 51.
- [7] Kurki-Suonio K. & Kurki-Suonio R. *The Concept of Force in the Perceptual Approach*. in H. Silfverberg and K. Seinelä (ed.) 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 1994. **A18/1994**, s. 321.
- [8] Kurki-Suonio K. & Kurki-Suonio R. *Fysiikan merkitykset ja rakenteet*. Limes ry., Helsinki 1994.
- [9] Kurki-Suonio K. & Kurki-Suonio R. *Vuorovaikuttavat kappaleet -- mekaniikan perusteet*. Limes ry., Helsinki, 1995
- [10] Kurki-Suonio K., Kurki-Suonio R., Lavonen J. & Hakulinen H. *Galilei 1. Opettajan opas*. Weilin+Göös 1994
- [11] Lehto H. & Luoma T. *Fysiikka 2*. Kirjayhtymä 1994
- [12] Louhisola O., Husar R., Karvonen J., Marttila K., Paakkunainen I., Puumalainen V. ja Wilander R. *Ympäristöni 3*. Otava 1979
- [13] Salmela M. *Keskijakovoimasta - vielä kerran*. Dimensio **59**, 4/1995, s.47.
- [14] Suomen autokoululiitto ry. *Talviajokoulu. Osa: Renkaan pito*. Opetusvideo