

## Voimat, vuorovaikutukset ja työ.

Kaarle Kurki-Suonio  
prof. emer. Järvenpää

Simo Hemilä kirjoittaa (Dimensio 6/99) fysiikanopetuksen ikuisesti ajankohtaisista kysymyksistä, jotka kuuluvat vakioaiheina jo useana vuonna pidettyyn Koulufysiikan tietorakenteiden kurssiimme. Monessa suhteessa erinomaiseen kirjoitukseen on jäänyt muutamia liian kiireen leimaamia kohtia, jotka kutsuvat kommentointiin.

Voimien "nimistä" olen pitkään kaivannut keskustelua, sillä suomalaisen fysiikan terminologia on tässä(kin) kohdassa horjuvaa. Näyttää siltä, että keskustelun puutteessa on päässyt muodostumaan "koulukuntia", joiden terminologiat vähän poikkeavat toisistaan ja jotka kaikki pitävät omia termejään vakiintuneina.

SH osuu asian ytimeen todetessaan, että "voimat nimetään vuorovaikutuksen perusteella". Termit pitäisi sopia siten, että voimien nimitykset systemaattisesti liittyvät niiden vaikutustapaan tai "syntymekanismiin". Näin muotoiltuna periaate ulottuu myös kosketusvoimiin. Tämän ohella on kiinnitettävä huomiota kansainväliseen terminologiaan.

SH:n kaukovaikutusvoimista käytän itse nimitystä *etävoimat*. Oikeastaan puhun mieluummin etävuorovaikutuksista. Mutta sanottiinpa "etä-" tai "kauko-", välisana "-vaikutus-" on tarpeeton ja vähän tautologinen. Ainahan voimat vaikuttavat, ja miltä maistuuukaan etävaikutusvuorovaikutus. Etävuorovaikutusten luetteloon muuten kuuluu neljäntenä *induktiovuorovaikutus*. Aragon kokeen tyyppisissä kokeissa se opitaan tuntemaan uutena vuorovaikutuksen lajina, jota tunnetut magneettisen vuorovaikutuksen lait eivät kata.

Terminologinen kirjavuus tulee vastaan varsinaisesti kosketusvoimista puhuttaessa. *Tukivoima* on minun ympäristössäni ainakin 40 vuoden ajan tarkoittanut voimaa, jolla kiinteän kappaleen pinta kovuutensa vuoksi tukee sillä lepävää, sitä koskettavaa tai sillä liikkuvaa kappaletta siten, että muodostuu pintojen mukainen "geometrinen rajoitus". Se kuuluu *rajoittaviin voimiin*, jotka staattisissa tilanteissa toimivat tasapainottavina voimina mahdollisuuksiensa mukaan. SH kutsuu rajoittavia voimia tässä staattisessa roolisaan *tukivoimiksi*. Pidän epäkohtana luokitustermin rajoittumista erityistilanteisiin.

Omaksumassani terminologiassa tukivoima on voiman laji, ei voimien luokka. Vaikutustapansa mukaisesti se on tukevaa pintaa vastaan kohtisuora. Englanninkielinen kirjallisuus käyttää siitä nimitystä *normal force*, ja suomalaisessa koulufysiikassa sitä sanotaan vastaavasti usein *normaalivoimaksi*. Tämä nimitys perustuu voiman suuntaan eikä syntytapaan ja on siksi voiman lajia tarkoittavaksi termiksi huono. Juuri tästä syystä olen itse liittynyt siihen "koulukuntaan", jossa tämä voiman laji on nimetty tukivoimaksi. Termi kuvaa mielestäni osuvasti sen vaikutustapaa. On ilmeistä, että tämä voiman laji myös tarvitsee oman nimen. SH käyttää vähän tätä muistuttavassa merkityksessä sanaa "työntövoima", joka assosioi kiusallisen voimakkaasti dynaamiseen tilanteeseen. Vaunuja työnnetään eteenpäin työntövoimalla, joka tässä ei tietenkään ole voiman lajitermi vaan vain tilannetta kuvaava sanonta. Minusta olisi kuitenkin hämäävää sanoa, että tiekin työntää, kun se vain tukee.

SH:n normaalivoima taas ei olekaan voiman laji vaan kaikkien pintaa vastaan kohtisuorien kosketusvoimien luokka. Tämä on laskennallinen, ei fysikaalinen luokka, sillä vain se normaalivoima, jota kutsun tukivoimaksi, on luonteensa perusteella pintaa vastaan kohtisuora. Muut normaalivoimat ovat todellakin eri syistä, kuten tarttumisesta (adheesio, koheesio) aiheutuvien voimien normaalikomponentteja. Itse miellän normaalivoiman komponentin nimitykseksi, joka ilmaisee suunnan olematta termi. Se, mitä vastaan (pintaa, nopeutta) kohtisuoraa komponenttia tarkoitetaan, ilmenee yhteydestä ja on tarvittaessa todettava.

Voima, joka estää tai jarruttaa pintojen liukumista toistensa suhteen, on *kitka*, lepo- tai liukukitka. Se on oma itsenäinen voiman lajinsa, jolla on oma luonteensa ja omat lakinsa. Niiden mukaisesti se on aina pinnan suuntainen. Ideaalitilanteessa, jossa kova kappale on kovalla alustalla, kosketusvoima on näiden kahden erilajisen voiman, tukivoiman ja kitkan yhteisvaikutus. Näiden sanominen kosketusvoiman komponenteiksi, johon olen itsekin syyllystynyt, on todellakin harhaanjohtavaa - laskennallisesti vaan ei fysikaalisesti motivoitua kieltä.

*Seinään nojaava sauva* (pystytasossa) on ylituettu. Siihen vaikuttavia kosketusvoimia ei voi laskennallisesti määrittää ilman keinotekoisia rajoituksia. Jos oletetaan esimerkiksi liukas seinä, alhaalta tasapainottavien

kosketusvoimien summa ei riipu alapään tuennan tavasta. Laskennassa on luonnollista käyttää jakoa vaaka- ja pystykomponentteihin. Mutta vain tasainen alusta tarjoaa tukivoiman ja lepokitkan idealisoitujen lakien avulla yksinkertaisen ja helposti hahmottuvan mahdollisuuden esimerkiksi tuennan pysyvyyden laskennalliseen käsittelyyn.

Alustalla liukuvan kappaleen liikettä vastustaa *liukukitka* (sliding friction). Koulukieleen yleistynyt liikekitka on omaperäinen suomalainen luomus. Se ei vastaa englanninkielistä termiä, ja se on kielelliseltä merkitykseltään harhaanjohtava. Se luo mielikuvan, jonka mukaan mikä tahansa liikettä vastustava voima on kitkaa. Yleiskielessä kitkalle on kyllä muodostunut tällainen merkitys yleisenä häiritseväksi, mutta se ei kelpaa sellaisen voiman lajin nimitykseksi, joka vastustaa nimenomaan vain liukumista. Joskus olen nähnyt käytettävän nimitystä "hankauskitka", joka kielellisen merkityksensä puolesta viittaa jopa paremmin kitkan syntytapaan. En kuitenkaan pidä tätä paremmuutta niin voimakkaana, että se olisi riittävä syy poikkeamiseen englanninkielisestä terminologiasta.

*Lepokitka* (static friction) on hyvä, lyhyt ja naseva suomennos. Joskus puhutaan myös tartuntakitkasta. Se korostaa lepäävän kappaleen ja alustan hitaasti kehittyvää adheesiota, jonka vuoksi jonkin aikaa paikallaan olleen kappaleen liikkeelle saamiseen tarvitaan suurempi voima kuin hetkeksi pysähtyneen kappaleen uudelleen liikkuttamiseen. Vaikka sillä näin onkin kokeelliseen määrittämiseen liittyvä perusteensa, en pidä sitä hyvänä voiman lajinimenä, koska siinä sekoittuu kaksi eri vaikutustapaa.

*Vierimisvastuksen* osalta SH:n teksti on huonosti oikoluettua. Siinä esiintyy oikean termin ohella myös vierimiskitka ja myöhemmin vielä pyörimisvastus. (Muuten, milloin auto pyörii?) Myös lepokitkan ja vierimisvastuksen suhdetta koskevaan kohtaan on jäänyt lipsahdus.

Vieriminen perustuu *lepokitkaan*, joka estää pyörivää kappaletta liukumasta alustalla ja ylläpitää siten tarvittavaa etenemisen ja pyörimisen kytkentymistä. Nimitys *kitka* liittyy pelkästään liukumiseen. Vierimisvastus ei ole kitkaa. Se aiheutuu, kuten SH selittää, alustan ja kappaleen muodonmuutoksista. Mekanisminsa puolesta se rinnastuu väliaineenvastukseen. Siksi on perusteltua käyttää samaa nimitystä "vastus" yhdenmukaisesti englanninkielisen terminologian kanssa, jossa kummastakin käytetään sanaa "resistance".

Vierimistä vastustava vierimisvastus ja sitä ylläpitävä lepokitka ovat kaksi eri voimaa. Ne aiheutuvat kahdesta erilaisesta vuorovaikutuksesta. Vierimisvastus jarruttaa sekä etenemistä että pyörimistä. (Niin kuin muutkin liikettä vastustavat voimat sekin voidaan tuki aktivoida kiihdyttäväksi voimaksi esimerkiksi vetämällä mattoa pallon alla.) Kovan kappaleen vieressä kovalla alustalla se on hyvin pieni. Lepokitkalla sen sijaan on vastakkaiset vaikutukset pyörimiseen ja etenemiseen. Jos se jarruttaa etenemistä, se kiihdyttää pyörimistä, ja päin vastoin. Se on rajoittava voima, joka on mahdollisuuksiensa puitteissa niin suuri kuin tarvitaan vierimisen ylläpitämiseksi.

*Keskeisvoima* ansaitsee oman saarnansa. Se on eniten väärinkäytettyjä termejä koulufysiikassa, eikä SH:kään osu virheiden ytimeen. Keskeisvoima suuntautuu *lakinsa perusteella* "voimakeskukseen" sen vaikutuksen alaisena liikkuvan *kappaleen paikasta ja liikkeestä riippumatta*. Pallon gravitaatiovoima ja pallomaisen varausjakauman sähköinen voima ovat keskeisvoimia. Muita keskeisvoimia esiintyy fysiikassa vähän etäisempinä laskennallisina malleina.

Mikään kosketusvoimaa ei voi olla aito keskeisvoima. Koulufysiikan laskennallisissa esimerkeissä tarkastellaan runsaasti tilanteita, joissa kappaleeseen vaikuttavien voimien yhteisvaikutus - joskus myös yksittäinen kosketusvoima - pitää kappaletta ympyräradalla. Voima suuntautuu tällöin ympyrän keskipisteeseen vain siinä erityistapauksessa, jossa kappaleen rataliike on tasaista, ja näyttää tällöin satunnaisesti keskeisvoimalta. Mutta voiman komponentti esittää vain voiman tietynsuuntaista osavaikutusta, kokonaisvoima taas voimien yhteisvaikutusta. Ne eivät ole itsenäisiä voimia, joten niistä ei myöskään voi käyttää voimien luokitustermejä (vrt. SH:n artikkelin alkujakson viimeinen lause.)

Kitkan merkitystä autoa kiihdyttävänä voimana SH tarkastelee perusteellisesti mutta kovin mutkikkaasti. Huomautus, jonka mukaan (lepo)kitka kiihdyttää mutta ei tee työtä, saattaa aiheuttaa "ahdistusta" fysiikan opettajissa. Opettajat tietävät hyvin, että etenemisliikkeen energiaperiaate seuraa dynamiikan peruslaista. Sen mukaan auton liike-energian muutos on yhtä suuri kuin siihen vaikuttavan ulkoisen (kokonais)voiman tekemä työ. Siten voima, joka kiihdyttää, lisää väistämättä myös (etenemisen) liike-energiaa ja tekee siis työtä. Ristiriita johtuu siitä, että kitkavoimasta, liike-energiasta ja työstä puhutaan kahdessa eri merkityksessä.

Kun autoa tarkastellaan yhtenä kokonaisuutena, sen liike on massakeskipisteen liikettä ja liike-energia tähän

liittyvää etenemisen liike-energiaa. Autoon vaikuttavana voimana kitka kiihdyttää, lisää liike-energiaa ja tekee työtä (auton massakeskipisteen siirtämiseksi).

Kun tarkastellaan auton pyörää, kitkalla on työntövaikutus etenemiseen ja vääntövaikutus pyörimiseen. Pyörän vieressä nämä vaikutukset tekevät yhtä suuret vastakkaismerkkiset työt. Kaikkiaan vierivään pyörään vaikuttava kitka siis ei tee työtä. Jos pyörä pyöriessään myös liikuu, negatiivinen työ on suurempi.

Mekaniikan perusteet avautuvat uudella tavalla, jos mekaniikkaa lähestytään vuorovaikutusten kautta (ks. kaksiosaisista artikkeliani Dimension tässä ja seuraavassa numerossa.) Erityisesti SH:n mainitsema Newtonin kolmannen lain idea sisältyi itse vuorovaikutuksen käsitteeseen.

Vuorovaikutuksella on kolme eri vaikutustapaa.

1. Työntö- tai veto- eli *vektorivaikutus* muuttaa osapuolten liikemääriä yhtä paljon vastakkaisiin suuntiin. Sen voimakkuuden ilmaisevat osapuoliin vaikuttavat voima- ja vastavoima.
2. Vääntö- eli *tensorivaikutus* muuttaa osapuolten pyörimismääriä yhtä paljon vastakkaisiin suuntiin. Sen voimakkuuden ilmaisevat osapuoliin vaikuttavat momentti ja vastamomentti.
3. Energia- eli *skalaarivaikutus* muuttaa osapuolten liike-energioita. Sen voimakkuuden ilmaisee vuorovaikutuksen tekemä työ, joka on yhtä suuri kuin osapuolten kaikkien vapausasteiden energioiden muutosten summa.

Vektori- ja tensorivaikutus vaikuttavat kumpikin omaan vapausasteeseensa, toinen osapuolten etenemiseen, toinen niiden pyörimiseen, tavalla, joka voidaan ymmärtää liikemäärän ja pyörimismäärän siirtämisenä osapuolelta toiselle. Mutta skalaarivaikutus liittyy samanaikaisesti osapuolten kaikkiin vapausasteisiin ja se voidaan tulkita energiansiirroksi vain, jos vuorovaikutuksella itsellään voi olla omaa energiaa.

Tästä vaikutustapojen peruserosta seuraa helposti käsitteellisiä sekaannuksia. Siinä ei ole mitään epäselvyyttä, että voima antaa kiihtyvyyden ja momentti kulmakihtyvyyden. Mutta työ muuttaa, tai voi muuttaa, kaikkien vapausasteiden energioita samanaikaisesti. Aineen atomirakenne tuo lopulta esille senkin näkökulman, että myös kappaleiden lämpeneminen kosketusvuorovaikutuksissa, kuten hankauksessa, on se osa vuorovaikutuksen tekemää työtä, joka siirtää energiaa aineen atomaaristen liikkeiden vapausasteisiin.

Kun työ ymmärretään vuorovaikutuksen skalaarivaikutukseksi rajoittumatta yhteen vapausasteeseen, huomataan, että vuorovaikutukset, joista rajoittavat voimat johtuvat, eivät koskaan tee työtä. Kun kappaletta työnnetään, vedetään tai nostetaan, voima ja vastavoima tekevät yhtä suuret vastakkaismerkkiset työt, joten vuorovaikutus siirtää energiaa suoraan työntäjältä jne. kappaleelle.

Kun ihminen ponnistaa kiinteältä alustalta, nousee tikkaita tai ottaa askelen tai kun auto lähtee liikkeelle, rajoittavien voimien (tukivoiman ja lepokitkan) vastavoimat eivät tee työtä. Mutta niiden osatöiden summa, jotka nämä vuorovaikutukset tekevät ihmisen tai auton liikkeen eri vapausasteisiin on nolla. Näissä tilanteissa vuorovaikutukset siirtävät kappaleen (ihmisen tai auton) sisäisten vuorovaikutusten vapautuvaa energiaa ulkoisille vapausasteille. Huomattava osa tästä energiasta jää aina kappaleen sisäisten vapausasteiden liike-energiaksi ja muuntuu useimmiten saman tien kappaleen sisäenergiaksi energiaa kuluttavien sisäisten vuorovaikutusten tekemän työn välittämänä.

Tähän liittyikin puheenvuoroni viimeinen kärki. Fysiikan tehtävien kielenkäytössä vähän kaikkialla maailmassa, Suomessakin ylioppilastutkinnon fysiikan tehtäviä myöten, on silloin tällöin tapana puhua ihmisen, koiran tms. olion tekemästä työstä esimerkiksi mäkeä noustaessa spesifioimatta sitä painovoimaa vastaan tehdyksi. Vaikka oppilaat osaavatkin kuin Pavlovin koirat reagoida tähän signaaliin tehtävän asettajan mielestä "oikein" ja käyttää kaavaa  $mgh$ , kysymys on käsitteellisesti virheellinen. Ainoa fysikaalisesti perusteltavissa oleva merkitys työlle, jonka koira tai ihminen tekee, on se työ, jonka hänen energiaa vapauttavat sisäiset vuorovaikutuksensa tekevät. Vain osa siitä tulee ulkoisen etenemisliikkeen hyväksi ja sitä kautta painovoimaa vastaan tehdyksi työkse ja koululaskennan ulottuville. Miksei koskaan kysyttyä työtä, jonka ihminen tekee juostessaan mäkeä alas?