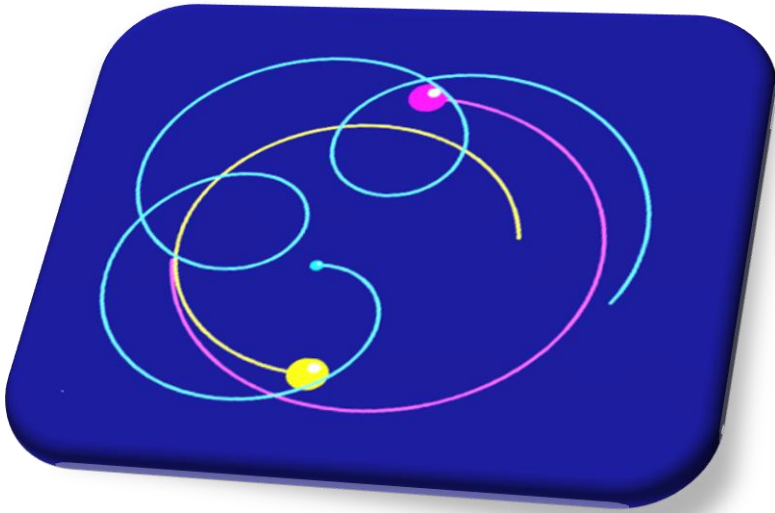




ENERGIA-KÄSITTEEN HÄMÄRYYS

Pohjoisen Pojat koulussa projekti: Tavoitteena teorian konkretisointi ja mallien visualisointi

Vesa Maanselkä, Karigasniemen koulu

2009

1 Energian idea hukassa	5
2 Energia ja suomen kieli.....	6
2.1 Työ	7
2.2 Potentiaalienergia.....	7
2.3 Lämpö	7
3 Systeemin määrittelyn merkitys.....	8
4 Kentät, energia ja massa	9
5 Opetuskokeilu.....	11
5.1 Skeittaajan energia painovoimakentässä	11
5.2 Heittoliike ja energia.....	12
5.3 Heiluri ja energia.....	13
5.4 Jousen energia	13
5.5 Taivaanmekaniikka ja energia.....	13
5.6 Sähköinen energia	14
6 Viitteet.....	15

ENERGIA-KÄSITTEEN HÄMÄRYYS

Energia-käsitteen opettamisen ja oppimisen ongelmia, Vesa Maanselkä

Eräs mitta energialle on raha. Havahdumme energian todellisuuteen katsoessamme pankkitilimme kulujen erittelyä. Polttoaine, sähkö ja ruoka ovat välttämättömiä vain ja ainoastaan siksi, että ne sisältävät käytettävissä olevaa energiaa. Ihminen pitää erityisesti ravinnosta, joka sisältää paljon energiaa, koska tämä intohimo on edesauttanut lajimme eloonjäämistä. Mutta *-ihminen ei elä ainoastaan leivästä*. Energian olemuksen ymmärtäminen ei vain auta ratkaisemaan tehokkaasti fysiikan tehtäviä tai useita käytännön ongelmia, vaan se tarkentaa ratkaisevasti yksilön kuvaa maailmankaikkeuden luonteesta. Fysiikan suurin tehtävä on antaa vastaus kysymykseen: Millainen todellisuutemme on ja millä säännöillä se pelaa? Tämä luonnon olemuksen kysyminen on hedelmöittänyt aikamme materiaalisin hyvinvoinnin. Uskon myös, että pysyvää ja aitoa motivaatiota luonnontieteiden opiskeluun ei saada aikaan ensisijaisesti näyttävillä kokeilla vaan johdattamalla oppilas oivaltamaan.

1 ENERGIAN IDEA HUKASSA

Energia on ilmiömaailman takana oleva ykseys, joka on katoamattomana mukana kaikessa. Energia-käsitettä määrittää IDEA¹ energian säilymisestä. Tämä idea kuuluu tuskin läpi käsitteiden ja kaavojen moninaisuuden takaa kouluopetuksessa. Tutkitusti energiaan liittyvät käsitteet aiheuttavat eniten hämmennystä fysiikan opiskelijoille. Energiaan liittyvät käsitteet, kuten *potentiaalienergia*, *liike-energia*, *lämpöenergia*, *sähköener-*

¹ **Kaikkien** fysiikan käsitteiden ja kaavojen perusta on **idea**, joka tulisi ensisijaisesti ymmärtää. Laskutehtävän tekninen suorittaminen ilman kaavan idean ymmärtämistä ei ole fysiikan opiskelua, vaan kaava-koneen käyttöä. Tämä tekninen suorittaminen tutkitusti aiheuttaa sen, että fysiikkaa ei osata soveltaa käytäntöön tai avoimiin työelämässä eteen tuleviin fysiikkaan liittyviin ongelmiin.

gia, *kemiallinen energia*, *ydinenergia*, *jousen energia*, *säteilyenergia* ja *lämpö*, ovat toki tarpeellisia, koska niillä viitataan tilanteeseen, jossa energian siirtymistä tai muuntumista tapahtuu.

Kuitenkin jos energian siirtymisen ilmiötä ei käsitellä kokonaisuudesta käsin yleisellä tasolla, vaarana on, että käsitteiden sekamelska peittää alleen yksinkertaiset lainalaisuudet, jotka mahdollistaisivat edes tyydyttävän kokonaiskuvan kaikkein perustavanlaatuisimmasta luonnonlaista.

Energia on mitta fysikaaliselle muutokselle. Samoin kuin celsiusasteikko on mitta ”kuumuudelle” tai ”kylmyydelle”. Energian yksikkö *kalori* on saatu mittaamalla, kuinka paljon energiaa vaatii lämmittää kilo vettä yhden celsiusasteen verran. Kaikkia luonnossa tapahtuvia muutoksia voidaan verrata tähän mittaan. Kaiken pohjalla on havainto siitä, että tietty suure säilyy muutoksesta toiseen. Jos tämä suure – energia – häviäisi, ei koko käsitteellä olisi mitään merkitystä. Ei ole muutosta ilman energian siirtymistä eikä energian siirtymistä ilman muutosta. Seuraavalla sivulla olevaan taulukoon on rinnastettu energian, voiman ja tehon käsitteelliset määritelmät sekä mittaamistoimenpiteellä saadut yksiköt näille. Tämän jälkeen taulukossa on muutama konkretisoiva huomio.

Klassisesti energia on vain *potentiaalienergiaa* ja *liike-energiaa*. Liike-energia(a) voi muuttua potentiaalienergiaksi ja päinvastoin. Tämä muuntuminen on jokaisen luonnon prosessin ytimessä. Jos kappaleet ovat liikkeessä suhteessa toisiinsa, niillä on liike-energiaa. Jos taas kappaleet vuorovaikuttavat voimakentän välityksellä (esim. painovoima, sähkö- tai magneettikenttä), niillä on potentiaalienergiaa. Maata kiertävällä kuulla on siis sekä liike- että potentiaalienergiaa. Kuun liike- ja potentiaalienergian määrät vaihtelevat, mutta kuun kokonaisenergian $E = E_{\text{liike}} + E_{\text{pot}}$ määrä pysyy vakiona.

Taulukko 1: Energian, voiman ja tehon määritelmistä oppilaille:

	VOIMA	ENERGIA	TEHO
Käsitteellinen määritelmä	Voima voidaan määritellä vaikutukseksi, joka muuttaa kappaleen liiketilaa. Voima on työntävä tai vetävä vuorovai- kus kahden tai useamman kappaleen tai hiukkasen välillä	Energia on suure joka säilyy kappaleiden tai hiukkasten paikkojen tai liiketilojen muutoksissa. Näitä ovat kappaleen: 1. lämpötilan muutos 2. siirtyminen voimakentässä (paikan muutos) 3. kiihdytys Kaikkia näitä muutoksia voidaan vertailla yhdellä ainoalla mitta-asteikolla, joka on energian asteikko Jouleina.	Teho on nopeus, jolla energia siirtyy kappaleelta toiselle tai muodosta toiseen.
Mittaamalla saatua määritelmä (operationaalinen määritelmä)	Voima voidaan mitata esimerkiksi jousen venymänä jousiva- an avulla	Mitataan energia joka siirtyy kun lämmitetään litra vettä yhden celsius asteen verran. Kun energian yksikkö on kiinnitetty, voidaan kaikki muut energian muodot tämän jälkeen mitata siirtämällä mitattava energiamäärä veden sisäisen energian muotoon.	Mitataan kappaleen tai nesteen energian muutos ja jaetaan tämä muutokseen kuluneella ajalla.
Onko sillä suuntaa?	Voiman suuruuden lisäksi on aina ilmoitettava voiman vaikutussuunta, eli voima on vektorisuure (tarvitaan koordinaatisto)	Energialla ei ole suuntaa, vaan pelkkä suuruus. Energia on siis skalaarisuure. (ilmoittamiseen riittää yksi luku)	Teholla ei ole suuntaa, kuten ei energialla- kaan.
Maksaako se? Voiko sen kuluttaa loppuun?	Ei maksa mitään, eikä se kulu. Sinun ei tarvitse maksaa mitään miljoonien Newtonien voimasta, joka pitää taloasi pystyssä	Kyllä kuluu ja kyllä maksaa. Bensa, talon lämmitys, sähköenergia maksaa ja kuluu.	Mitä suurempi teho on, sitä nopeammin energiaa kuluu ja sitä nopeammin pankkitili tyhjenee...
Voiko se olla yhden kappaleen tai yhden hiukkasen ominaisuus?	Ei voi. Voima on aina vuorovai- kus vähintään kahden kappaleen välillä. Kaksi ihmistä työntää toisiaan, kaksi magneettia hylkii toisiaan jne.	Voi olla. Liikkuvalle kappaleella, kuten tennispallolla on liike-energiaa.	Ei voi. Teho kertoo vain sen kuinka nopeasti pyykinpesukone siirtää sähköenergiaa veden energiaksi tai linkousrummun pyörimisenergiaksi.
Yksikkö	Newton N	Joule J	Watti W eli J/s

Modernin fysiikan ihmeitä paljastanut Einstein päätteli, että energia voidaan kvantifioida *massan* tai *liike-energian* määrällä, koska $E = mc^2$. Tämän vuoksi alkeishiukkasten massa ilmoitetaan yksiköllä MeV/c², eli energiaa per valonnopeuden neliö. Massan ja energian vastaavuus johtaa myös hämmästyttäviin johtopäätöksiin: Virittäessäni kuminauhaa sen massa kasvaa tai siirtäessäni magneettia irti jääkaapin ovesta jääkaapin ja magneetin paino nousee. Energia sitoutuu magneetikenttään, jolloin siihen sitoutuu myös massaa. Kentät ovat todellisia! Käsittelen seuraavassa oppimisen ongelmia energiaperiaatteen ymmärtämisessä sekä asioita, joihin olisi kiinnitettävä opetuksessa enemmän

huomiota, sekä sen jälkeen energiaa modernilla tasolla.

2 ENERGIA JA SUOMEN KIELI

Energiäkäsitteen abstraktiuden vuoksi opettajan ja oppikirjan on käytettävä energiaan liittyviä käsitteitä täsmällisesti tai ainakin täsmennettävä, mitä vakiintuneet sanonnat pitävät sisällään. Lauseet eivät saa jäädä roikkumaan tyhjän päälle siten, ettei oppilas pysty ajattelemaan, mitä seuraavaksi tapahtuu tai sitä mistä lähdettiin ja mihin päädyttiin energiaa ajatellen. Kausaalisuuden on oltava ilmeinen, ja konteksti on kuvail-

tava huolellisesti hämmennyksen ja sekaannuksien välttämiseksi.

2.1 TYÖ

Työ tarkoittaa energian siirtoa jonkin rajatun systeemin ja ympäristön välillä. Kun voima tekee työtä systeemiin, energiaa siirtyy ympäristöstä systeemiin, jolloin ympäristön energia vähenee systeemiin siirtyneen energian verran. Työstä puhuttaessa tulisi siis aina täsmentää

1. *voima, joka tekee työtä*
2. *rajata systeemi, johon työtä tehdään*
3. *energian lähde eli ympäristön menettämä energian muoto*
4. *energiamuoto systeemissä, johon ympäristön energia siirtyy.*

Epätasälliset ilmaisut kuten ”työtä tehtiin” tai ”gravi-taatiovoima tekee työtä” tai ”jousi tekee työtä kappaleeseen” on hyvä tarkentaa. Jos ajatellaan painovoimakentässä putoavaa palloa systeeminä, niin tulisi sanoa: ”Painovoima tekee työtä pallon muuttaen potentiaalienergiaa² pallon liike-energiaksi.” Toinen esimerkki voisi olla seinään kiinnitetty jousi, joka liikuttaa systeemiä, joka on kappale. Tällöin tulisi sanoa: ”Energiaa siirtyy jousen potentiaalienergian muodosta kappaleen liike-energian muotoon kappaleeseen kohdistuvan jousivoiman tekemän työn ansiosta.”[1,2]

2.2 POTENTIAALIENERGIA

”Kappaleen potentiaalienergia” on opetuksessa tyypillisesti käytetty väärä ilmaus, joka on vakiintunut kielenkäyttöön niin syvästi, että sitä ei enää luultavasti voi muuttaa. On vain tarkennettava, mitä ilmauksella tarkaan ottaen tarkoitetaan. Potentiaalienergia ei ole kappaleen ominaisuus, vaan sen olemassa olo edellyttää vähintään kahta kappaletta eli vähintään kahden kappaleen systeemiä. Potentiaalienergia on kentän tai systeemin ominaisuus, ei koskaan yhden kappaleen ominaisuus. Parempi, joskin ehkä kankea, ilmaus olisi ”pallo-maa-systeemin potentiaalienergia”.

² ts. painovoimakenttään varastoitunutta energiaa. Tarkkaan ottaen potentiaalienergia ei ole kappaleen ominaisuus vaan kentän ominaisuus. Painovoimakentässä on energiaa vasta, kun siihen tuodaan jokin massa.

Usein toistuva väite oppikirjoissa on, että potentiaalienergian määrää kappaleen paikka ts. asema (josta vanha asemaenergia-termi). Mekaniikassa tämä ei aiheuta suurta murhetta, mutta jos ajatellaan magneettikentässä olevaa kompassineulaa, tällä on potentiaalienergiaa, joka riippuu kompassin neulan paikan lisäksi myös neulan suunnasta magneettikentässä. Mekaniikan käsitteistön pohjalle rakennetaan myös sähkömagnetismin teoria, joten tämäkin olisi hyvä tarkentaa opetuksessa [3].

2.3 LÄMPÖ

Sana lämpö on väärinkäytetyin fysikaalinen termi arkikielessä sekä valitettavasti myös oppikirjoissa. Lämpöä ei ensinnäkään *siirry*, vaan energiaa siirtyy esimerkiksi lämmitettäessä kappaletta tai systeemiä. Sana lämpö, kuten myös työ, viittaa aina *energian siirtymiseen* ympäristön ja systeemin välillä. Lämpö on nimi prosessille, jossa ympäristöstä siirtyy energiaa systeemin hiukkasten liike-energian muotoon³ eli systeemin *sisäisen energian* muotoon. Sisäinen energia ja lämpöenergia tarkoittavat samaa asiaa, joten termi lämpöenergia tulisi julistaa kieltoon, koska se harhauttaa oppilaita käyttämään lämpöä ja lämpöenergiaa synonyymeina. Lämpö ei ole nimi jollekin, joka siirtyy, eli emme voi puhua alueesta, purkista tai kappaleesta, *jossa* olisi lämpöä. Suomen kieleen sana ”lämpö” ei sovi muutoin kuin kestonmuotona. Voimme sanoa, että ”jotakin lämmitetään parhaillaan” tai ”jotakin lämmitettiin jonkin aikaa” tai, että ”energiaa siirtyi lämmittämällä” tai ”lämmittämisen seurauksena”, mutta on vaikea keksiä fysikaalisesti totta lausetta, jossa voisi käyttää sanaa ”lämpö”.

Oppikirjat kertovat usein, että lämpö on ”aineen rakenneosasten liikettä”, mikä aiheuttaa sen virheellisen käsityksen, että lämpö olisi kappaleen tai systeemin ominaisuus tai että kappale sisältäisi lämpöä. Samoin tekevät myös yleisesti oppikirjoissa esiintyvät sanonnat kuten ”lämmön siirtyminen”, ”lämpövirta”, ”kappaleen säteilemä lämpö”, ”veden saama lämpö”, jotka johtavat oppilaiden ajatukset systemaattisesti harhaan. Sanan lämpö paikalle ei voi sijoittaa yllä olevissa sanonnoissa oikeata, tilannetta kuvaavaa termiä *energian siirtyminen* sen eri taivutusmuodoissakaan.

³ tätä kautta myös hiukkasten väliseksi potentiaalienergiaksi jos systeemi ei ole ideaalikaasua sisältävä astia

Käsitteiden virheellisen käytön lisäksi kouluopetus sivuuttaa lämpöopin mikrotason kuvailun, jossa lämpö tulisi ilmeisemmäksi ja helpommin tajuttavaksi hiukkasten ”tönimisenä”. Toisin sanoen mikrotason kuvailussa lämpö voitaisiin yhdistää hiukkasten törmäyksiin liike-energian siirtyessä hiukkaselta toiselle. Tässä yhteydessä lämpöopin ja kemiassa tärkeää *tasapainotilan* käsitettä pystyisi myös havainnollistamaan ja kuvailemaan helposti. Oppikirjoissa määritellään tasapainotila tilaksi, jossa energian siirtymistä ympäristön ja systeemin välillä ei tapahdu. Tämä ei tarkalleen ottaen pidä paikkaansa. Energiaa siirtyy jatkuvasti, mutta systeemin ympäristöltä vastaanottama energiamäärä on sama kuin systeemin ympäristöön luovuttama energiamäärä ajan suhteen. Katsottaessa aineen mikrotasoa vaikkapa simulaation avulla tämä havaitaan itsestään selvyydeksi, koska molekyylien nopeus systeemissä on sama kuin ympäristössä, eli törmäykset ovat molemmiin puolin systeemin rajaa (yleensä astian seinämää) yhtä kovia.

C. M. Barrow artikkelissaan *Thermodynamics should be build on energy – Not on heat and work*⁴ ehdotti, että sana ”lämpö” olisi yksinkertaisesti poistettava kokonaan opetuskäytöstä. Tämä ei ehkä ole mahdollista, koska opettajien ja muun väestön on puhuttava samaa kieltä, muutoinhan viesti ei mene perille. Arkielämä määrittelee kielen sisällöt. Fysiikan opetuksessa on tyydyttävä tähän ja tarkennettava arkikielessä käytössä olevia termejä tai sitten, kuten lämmön tapauksessa, luotava arkitermin päälle uusi ”oikea” fysikaalinen merkitys. Tämä tietenkin aiheuttaa tavallaan turhaa vaivaa opetukselle, joka ei voi lähteä rakentamaan käsitteitä puhtaalta pöydältä. Alla olevassa taulukossa on ehdotus käytettäville termeille ja niiden merkityksille lämpöopin energiakäsitteille [4].

⁴ G.M. Barrow, ”Thermodynamics should be build on energy – Not on Heat and Work,” J. Chem. Educ. 65(2), 122-125 (feb 1988).

Taulukko 2: lämpöopin käsitteistö

termi	merkitys opetuskäytössä
sisäinen energia	<i>systeemin kaikkien hiukkasten yhteenlasketut liike- ja potentiaalienergia</i>
lämpöenergia	<i>ei käytössä – varoitus</i>
lämpötila	<i>systeemin molekyylien keskimääräinen liike-energia</i>
lämpö	<i>prosessin nimi, jossa energiaa siirtyy</i> <i>rinnastus työhön: ”mikroskooppinen työ”</i> <i>lisäksi: arkimerkityksien ja ennakkokäsitysten vaikutuksen torjunta</i>

3 SYSTEEMIN MÄÄRITTELYN MERKITYS

Systeemin määrittely tarkoittaa yksinkertaisesti alustavaa selvitystä siitä, mihin objekteihin ajattelemme fysikaalisen muutoksen kohdistuvan ja siitä mitkä objektit ovat mukana energiansiirtymisprosessissa. Ympäristö tarkoittaa systeemin ulkopuolelle jäävää maailmaa, josta systeemiin vaikutetaan jonkin voiman tai voimien välityksellä. Eristetty systeemi tarkoittaa kuviteltua tilaa, jonka sisään rajaamme kaikki tapahtumat. Energiaa ei siirry oletetun eristetyn systeemin rajojen läpi, joten energian määrä eristetyssä systeemissä on vakio. Systeemi voi tarkoittaa yksinkertaisimmillaan yhtä kappaletta ja laajimmillaan koko universumia. Universumi on mitä ilmeisimmin eristetty systeemi, jolloin maailmankaikkeuden kaikki energia on peräisin alkuräjähdyksestä. Energia ei lopu koskaan, mutta sen käytettävyyden huononee entropian ts. epäjärjestyksen kasvaessa. Systeemin määrittely selkeyttää monia energian siirtymiseen tai muuttumiseen liittyviä tilanteita sekä antaa oppilaan ajattelulle kontekstin ja toimii hyvänä alustuksena esimerkkitehtäviin. Mikäli systeemiä ei määritellä, oppilas ei voi tietää, mihin ja miten energian säilymislakia tulisi soveltaa.

Miten energian liittyy tilanteeseen, jossa kappaletta työnnetään tasaista kitkallista pintaa pitkin? $W=Fs$, mutta kappaleen ollessa tasaisessa liikkeessä ei energiaa siirry ainakaan kappaleen liike-energian muotoon. Kohdistettaessa huomio pelkkään kappaleeseen eli oletettaessa sanattomasti (huolimattomasti) yhden kappaleen systeemi niin tällöin energiaa kulkee sisään ja ulos systeemistä eikä siihen päästä käsiksi. Jos mää-

ritellään systeemiksi kappale sekä pinta, niin tilanne selkeytyy: kitkavoima tekee työtä (lämmittää) liikuttaessaan pinnan molekyyliä jolloin pinnan lämpötila nousee. Kitkavoima siis tekee systeemin sisällä työtä muuttaen ulkopuolelta systeemiin siirtynyttä energiaa (= kappaletta työntävän voiman tekemä työ) systeemin (tai pinnan joka on systeemissä) sisäisen energian muotoon.

Ilman systeemin määrittelyä oppilas saattaa hämmentyä myös usein esiintyvistä yhtälöistä $W = -E_{pot}$ ja $W = E_{pot}$. Ensimmäinen pätee esimerkiksi putoamisliikkeeseen, mutta jälkimmäinen määrittelee nostotyön. Yhtälössä, jossa potentiaalienergian edessä on miinus-merkki, oletetaan systeemiksi putoava kappale sekä maapallo, vaikka sitä ei erikseen mainita. Systeemi on eristetty ja painovoima tekee työtä systeemin sisällä. Koska energia säilyy eristetyssä systeemissä, painovoiman tekemä työ on pois kappaleen potentiaalienergiasta. Nostotyön yhtälössä systeemiksi oletetaan, sitä taaskaan erikseen kertomatta, ainoastaan kappale jota nostetaan. Tällöin tehdään ulkopuolelta työtä systeemiin jolloin sen energia kasvaa kappaleen saadessa potentiaalienergiaa. On siis tarkennettava, tehdäänkö työtä systeemin sisällä vai systeemille. On myös parempi kertoa, mitä oletetaan, kuin olettaa kertomatta [6].

4 KENTÄT, ENERGIA JA MASSA

Pyrin vielä lopuksi selventämään massan ja energian vastaavuutta ilman kaavojen pyörittelyä. Kuten edellä todettiin, energia on vain potentiaalienergiaa ja liikeenergiaa. Kaikki muut energian muodot, kuten lämpöenergia, ydinenergia, säteilyenergia tai sähköenergia palautuvat näihin kahteen perustavanlaatuisen energiamuotoon. Modernin fysiikan löydettyä hiukkasmaailman lainalaisuudet voidaan sanoa, että energia on energiaa levossa tai energiaa liikkeessä. Levossa oleva energia on aina jonkin kentän energiaa. Kentät aiheuttavat luonnon neljästä perusvoimasta. Näin ollen energia levossa on siis painovoimakentän, sähkömagneettisen kentän tai kvarkin vahvaydinvoimakentän energiaa. Elektronin ympärillä on sähkökenttä, mutta jos tarkastelemme pelkästään yhtä elektronia, elektronin sähkökentässä ei ole lainkaan energiaa. Tällöin kentän ja ehkä myös elektronin itsensä olemassa olo voidaan kyseenalaistaa. Energiaa elektronin kentässä

on vasta kun elektronin kenttään tuodaan toinen varaus, joko positiivinen tai negatiivinen. Samoin maan painovoimakentässä on energiaa vain siksi, että maa vuorovaikuttaa toisen massa kanssa. Energiaa kutsutaan tämän painovoimakentässä olevan massan potentiaalienergiaksi. Energia kuitenkin varastoituu kenttään, ei kappaleeseen, se on siis kentän, ei kappaleen tai varauksen ominaisuus. Kentät, kuten voimatkin, ovat siis olennaisesti vuorovaikutusta kahden tai useamman objektin välillä.

Olkoon meillä kaksi magneettia, jotka vetävät toisiaan puoleensa. Siirrettäessä magneetteja irti toisistaan joudumme tekemään työtä magneettista voimaa vastaan. Kahden magneetin systeemiin siis siirretään energiaa. Tällöin ulkoa systeemiin tulleen energian täytyy varastoitua johonkin, koska suljetun systeemiin sisään syötetty energia säilyy. Missä siirtynyt energia on? Se on magneettien välisessä kentässä. Hämmästyttävää kyllä, kentällä on tällöin myös massa, koska energia on **yhtä kuin** massa $\times$ valonnopeuden neliö eli $E = mc^2$. Lisääntynyt massa on siis tyhjiössä magneettien välissä. [7,8]

Tämän suhteellisuusteorian jälkeisen energiakäsityksen valossa voidaan sanoa, että energia on joko:

1. *Energiaa liikkeessä (E_{liike}) tai*
2. *Energiaa levossa (E_0), jolloin*

$$E = E_0 + E_{liike} = \gamma mc^2,$$

$$\text{missä } \gamma = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Energia voidaan kvantifioida tällöin massan ja liikeenergian avulla, tai fysiikka voidaan formuloida jättämällä massan käsite kokonaan pois. Massa voidaan aina ja kaikkialla ilmoittaa yksiköllä E/c^2 .

Fysikaalisissa prosesseissa energian säilyminen on siis massan muuttumista liike-energiaksi tai päinvastoin. Kaksi toisiinsa suurella nopeudella törmäävää protonia synnyttää massallisia hiukkasia. Protonien lähestyessä toisiaan niiden liike-energia muuttuu sähköiseksi potentiaalienergiaksi toisiaan hylkivien positiivisten varusten välisessä tilassa. Riittävällä nopeudella toisiinsa törmäävät protonit synnyttävät massallisia hiukkasia, kuten neutraalin *pion-hiukkasen* π^0 . Liike-energia on muuttunut massaksi.

Elektronien törmätessä toisiinsa emittoituu fotoni, jolloin liike-energia on muuttunut hetkellisesti elektronien välisen kentän potentiaalienergiaksi, eli massaksi, minkä jälkeen massa muuttuu massattoman fotonin liike-energiaksi.

Lopuksi arkipäiväinen esimerkki jalkapallokentältä: Kun potkaisen pallon kohti maalia, osa massastani muuttuu työtä tehdessäni pallon liike-energiaksi. Maalivahdin siepatessa pallon, pallo ja maalivahdin kädet lämpenevät törmäyksessä (sähköisen vuorovaikutuksen kautta). Lopulta energia säteilee maalivahdin käsistä ulos massattomina fotoneina eli sähkömagneettisena infrapunasäteilynä. Lopussa siis pieni osa massastani on muuttunut avaruuteen säteilevien fotonien liike-energiaksi. Prosessissa siis:

$$\Delta m \rightarrow E_{\text{liike}} \rightarrow \Delta m \rightarrow E_{\text{liike}}$$

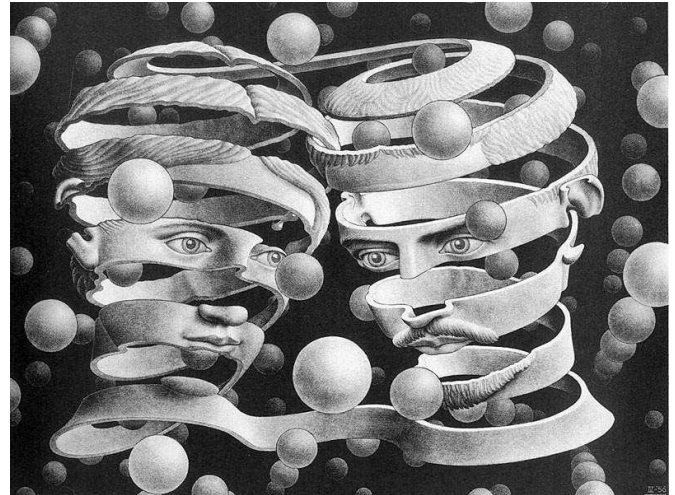
Energia ei ole enää organisoituneena massakseni tai pallon liike-energiaksi, vaan se on sekaisin satunnaisiin suuntiin säteilevien fotonien liike-energiana, jota ei enää saa talteen. *Entropia on kasvanut.*

Mitä fysiikan löytämät lait kentistä, energiasta ja massasta tarkoittavat jos yritämme muodostaa *mahdollisimman* oikean tai tarkan käsityksen todellisuudesta? Niin sanottu materia on ”vain” kenttien todellistumaa eli vuorovaikutusta, ja loppu energia on liikettä⁵. Nobel palkittu, kvanttiteorian kenttäteoriaa kehittänyt fyysikko Steven Weinberg puhuu ”kenttätodellisuudesta” (fied view of reality):

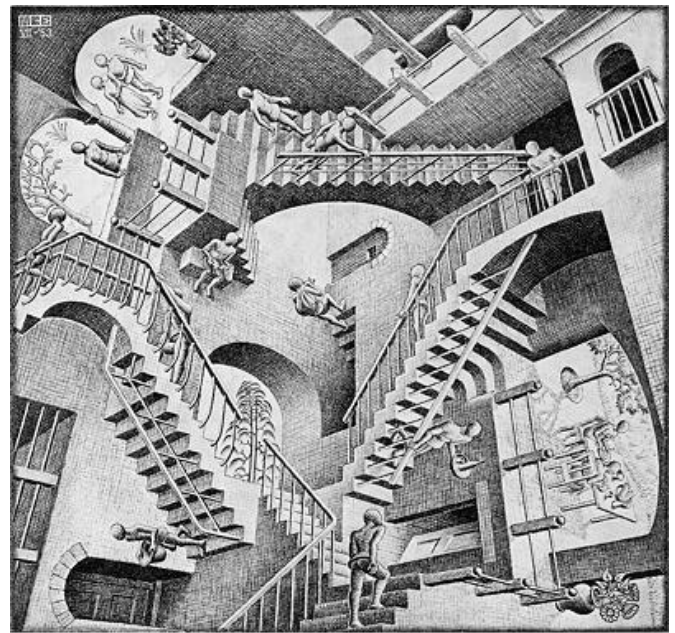
”There was supposed to be one field for each type of elementary particle. The inhabitants of the universe were conceived to be a set of fields—an electron field, a proton field, an electromagnetic field—and particles were reduced to mere epiphenomena. In its essentials, this point of view has survived to the present day, and forms the central dogma of quantum field theory: the essential reality is a set of fields subject to the rules of special relativity and quantum mechanics; all else is derived as a consequence of the quantum dynamics of these fields”.⁶

Todellisuutemme on siis perimmältään *vuorovaikutusta* ja *liikettä*. Emme voi paikallistaa mitään emmekä

osoittaa mihinkään tarkasti. Ei ole olemassa todellista objektia; ei kirjaa kirjana, ei atomia atomina tai kvarkkia kvarkkina. Kaikki on olemassa vain siksi, että voimat vuorovaikuttavat. Ehkä jotain tästä pitäisi myös kertoa oppilaille.



Vuorovaikutus



"Relativiteit" © 1953 by M.C. Escher

suhteellisuus

Escher kuvaili taiteen keinoin todellisuuttamme...

⁵ Kaikkien muiden hiukkasten paitsi kvarkkien ja elektronien lepomassat selittyvät kentillä. Lopullinen kokeellinen todistus ”kenttätodellisuudelle” vaatii vielä Higgsin bosonin löytymisen.

⁶ Steven Weinberg, Heinz Pagels kirjasta ”The Cosmic Code (Bantam Books, New York, 1983), sivu 239.

5 OPETUSKOKEILU

Toteutin opetuskokeilun kahdeksannelle luokalle tavoitteena laajentaa ja syventää oppilaiden ymmärrystä energian roolista eri ilmiöissä. Läheskään kaikkea edellä esiin tulleita ongelmia opetuksessa ei ollut mahdollista rinnastaa opetuskokeiluun johtuen oppilaiden vähäisistä tiedoista ja aiheen laajuudesta. Oppilaiden esitiedot rajoittuivat työntö- ja vetovoimiin. Painovoima ja sähköinen vuorovaikutus ymmärrettiin kahdeksannen luokan vaatimalla tasolla. Opetuskokeilu sitoi ilmiöitä yhteen hyvin fenomenologisella tasolla. Etsimme ilmiöistä samankaltaisuuksia simulaatioiden avulla ja mietimme liike- ja potentiaalienergioiden osuutta kokonaisenergiasta sekä kitkan roolia energian siirtäjänä tai sen ”hukkaajana”. Seuraavassa opetuskokeilun runko, joka toteutettiin dialogisessa vuorovaikutuksessa oppilaiden kirjoittaessa muistiin havaintojaan sekä päätelmiään.

1. Energia ja skeittaaja maan painovoimakentässä

- skeittaajaan vaikuttavat voimat
- skeittaajan liike- ja potentiaalienergia, sekä kokonaisenergian säilyminen
- skeittaajan painon vaikutus energiaan ja liikkeeseen 20 kg bulldog vs. 75 kg mies
- skeittaaja kuun painovoimakentässä
- skeittaaja ja silmukka: millä ehdolla skeittaaja kiertää silmukan?

2. Heittoliike ja energia

- Liike- ja potentiaalienergia heittoliikkeessä
- yhtäläisyydet ja erot skeittaaja-simulaatioon

3. Heiluri-simulaatio ja energiamuodot

- heilurin massan vaikutus liikkeeseen
- heilurin varren pituuden vaikutus energiaan
- yhtäläisyydet skeittaaja -simulaatioon

4. Jouseen kiinnitetyt punnukset ja energia

- painon vaikutus jousen energiaan
- jousen jäykkyyden vaikutus energiaan
- yhtäläisyyksien etsintä edellisiin simulaatioihin

5. painovoima ja taivaanmekaniikka

- potentiaali- ja liike-energiat aurinkoa kiertävän planeetan ja komeetan tapauksessa

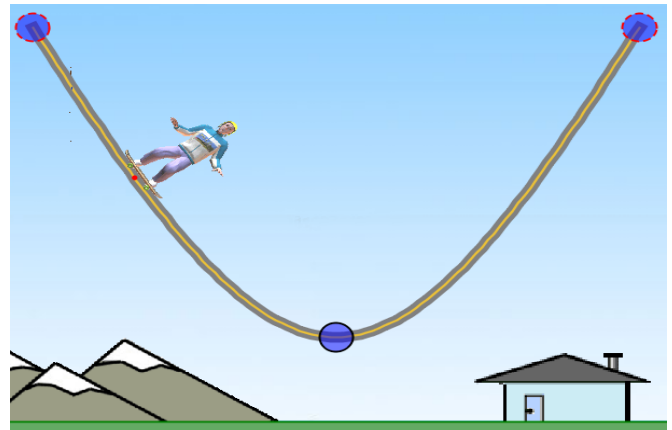
- Systeemin liike- ja potentiaalienergia neljän tähden ”baletin” tapauksessa

6. sähköinen voima ja energia

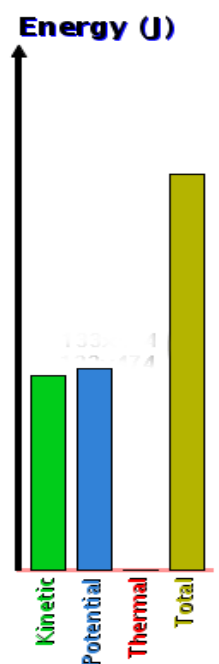
- sähkökenttä ja ”varausjäkiekko”
- sähköinen värähtely massallisen varauksen liike- ja potentiaalienergioiden välillä
- sähkövarausplaneetta ja sitä kiertävä varauskuu
- sähköisen potentiaalienergian ja painovoiman aiheuttaman potentiaalienergian analogisuus
- sähkökentän ja painovoimakentän analogisuus.

Työskentely simulaatiolla perustuu havainnon ohjaamiseen ja mallin visualisoimiseen. Seuraavassa käyn läpi kuvien tuella edellisessä luettelossa esiintyvät kohdat.

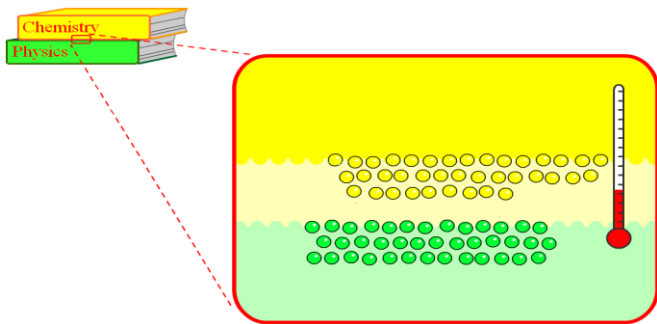
5.1 SKEITTAAJAN ENERGIA PAINOVOIMAKENTÄSSÄ



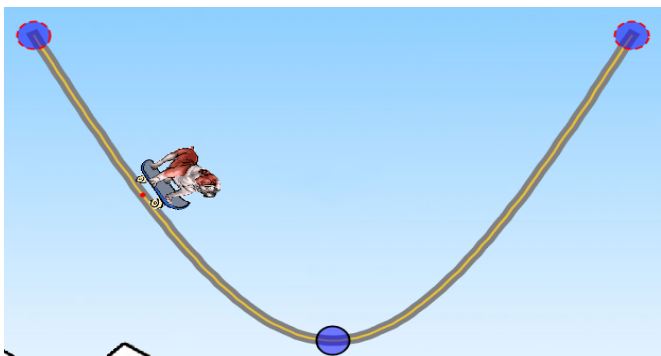
Opetuskokeilu alkoi simulaatiolla, jossa skeittaaja liikkuu rampilla maan painovoimakentässä. Liike- ja potentiaalienergian vaihtelu sekä kokonaisenergian säilyvyys on esitetty kasvavina ja vähenevinä pylväinä. Kitkan mukaan ottaminen siirtää skeittaajan liike-energiaa rampin molekyylien liike-energiaksi eli rampin lämpötila nousee. Kitka ei hävitä tai ”tuhoa” energiaa vaan muuttaa sitä molekyylien liike-energiaksi.



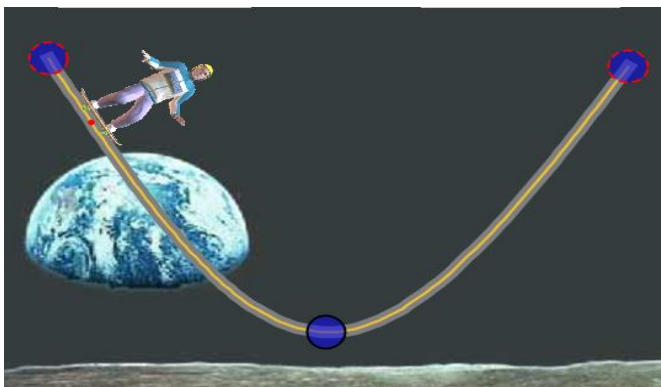
⁷ Simulaatiot ovat vapaasti kopioitavissa osoitteesta: <http://www.phet.colorado.edu>



Mikrotason kitkasimulaatio oli tässä kohden visuaalisena ja ilmiötä konkretisoivana tukena. Yllä olevassa simulaatiossa konkretisoituu muutoin hyvin vaikeasti käsitettävä kitkan olemus. Kitka on yksinkertaisesti sähköistä vuorovaikutusta pintojen molekyylien välillä. Kun oppilas liikuttaa kirjoja vastakkain, liikkuvan keltaisen kirjan molekyylit saavat vihreät molekyylit liikkumaan. Molekyylien lämpöliikkeen ja energian yhteys oli oppilailla kirkkaasti mielessä aikaisemman lämpöopin mikrotasoa kuvailevan opetuskokeilun ansioista.

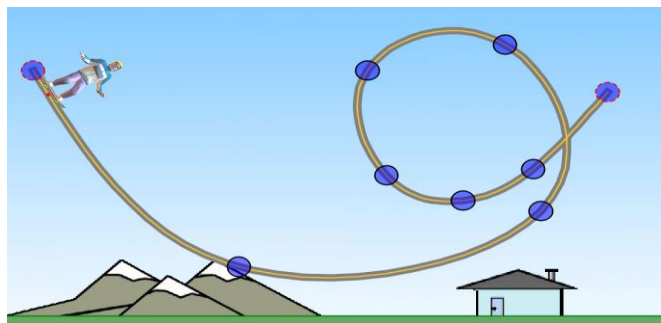


Skeittaajan massan vaikutuksen tutkiminen bulldogin avustuksella: 75 kg painavan miehen tilalle vaihdettiin 20 kiloinen koira. Havaittiin, että skeittaajan paino ei vaikuta kitkattomissa olosuhteissa liikkeeseen millään tavalla, ainoastaan kokonaisenergiaa on pienempi.



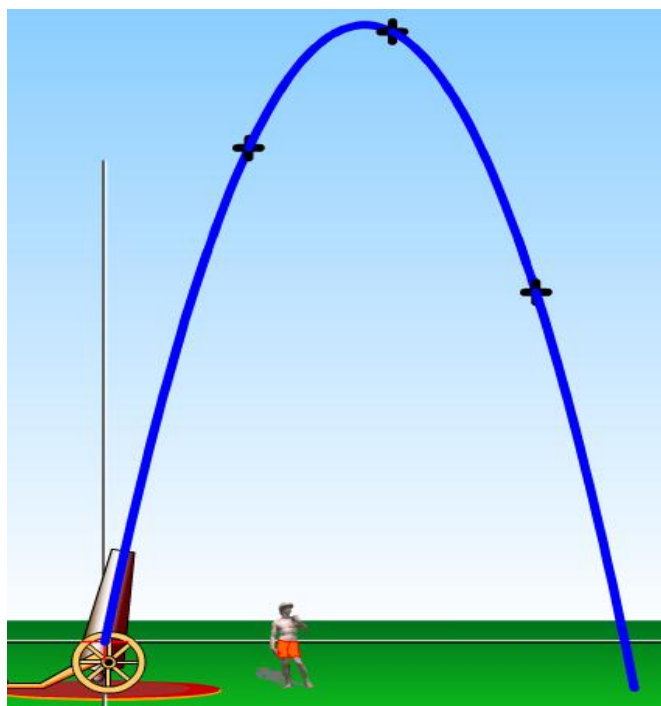
Painovoiman suuruuden vaikutuksen tutkiminen liikkeeseen ja energiaan: Havaittiin, että liike (kiihtyvyys) on hitaampaa ja kokonaisenergia pienempi kuun painovoimakentässä. Kuu kohdistaa skeittaajaan pienemmän voiman kuin kotiplaneettamme. Tämä voi-

daan päätellä siitä, että kuussa kiihtyvyys alaspäin on huomattavasti pienempi kuin maassa. Kuvassa taustalla näkyy planeetta Maa.



Silmukka ja skeittaaja: Tutkimme, millä ehdolla skeittaaja kiertää silmukan ja pääsee toiselle puolelle. Havaittiin, että tämä riippuu ainoastaan lähtökorkeudesta eli skeittaajan potentiaalienergiasta. Kitkattomissa olosuhteissa potentiaalienergia muuttuu rampin pohjalla kokonaan liike-energiaksi, mutta koska energia säilyy, liike-energia muuttuu lopulta potentiaalienergiaksi, joka vastaa täysin alkuperäistä potentiaalienergian määrää.

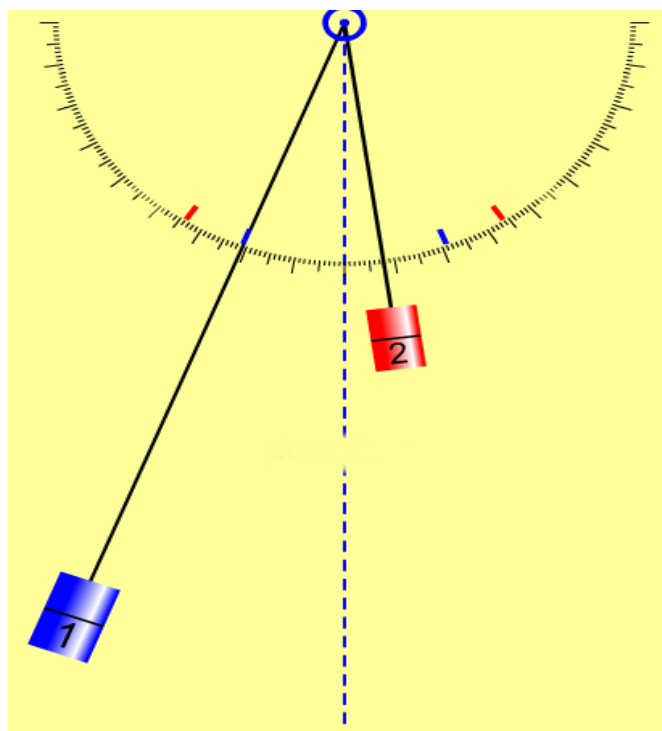
5.2 HEITTOLIIKE JA ENERGIA



Heittoliikkeen energiamuodot käytiin läpi askel askelelta: Tykinammuksen kemiallisiin sidoksiin varastoitunut energia muuttuu ammuksen liike-energiaksi, minkä jälkeen potentiaalienergia lähtee kasvamaan ja saavuttaa maksiminsa ammuksen kaaren lakipisteessä. Ammuksen pudotessa kohti maata painovoima muuttaa ammuksen potentiaalienergian takaisin liike-

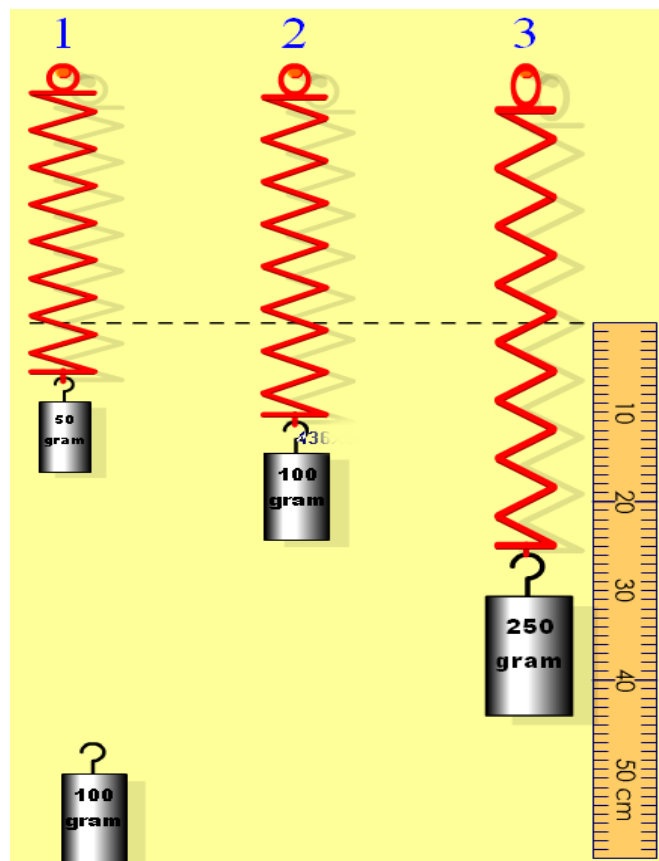
energiaksi. Oppilaat osasivat välittömästi sanoa, milloin potentiaalienergia on suurimmillaan, mutta se, että liike-energia on kitkattomissa olosuhteissa sama alussa ja lopussa, ei ollut aivan selvää. Jouduimme kertaamaan myös kemiallisen energian käsitettä hiukan. Kemiallinen energia on atomien välisten sähköisten sidosten potentiaalienergiaa.

5.3 HEILURI JA ENERGIA



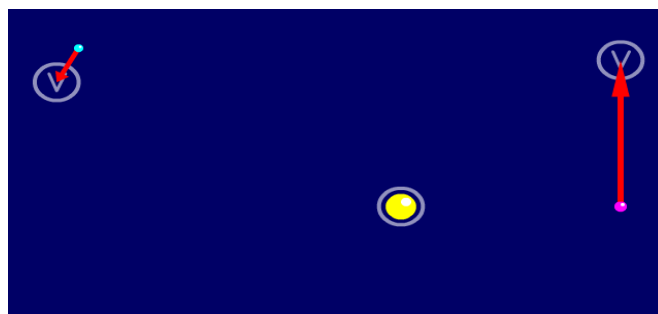
Energia ja heilurit: Oppilaiden tehtävänä oli selvittää skeittaaja-simulaation perusteella heilurin potentiaali ja liike-energioiden vaihtelu sekä vertailla kahden erimittaisen heilurin kokonaisenergiaa. Tarkoituksena oli havaita se, että heilurin massa ei vaikuta liikkeeseen, mutta analogisesti skeittaaja-simulaation kanssa kokonaisenergia kasvaa, mikäli massaa kasvatetaan. Mietimme myös, miten heilurin varren pituus vaikuttaa heilurin liikkeeseen ja kokonaisenergiaan. Totesimme, että varren pituudella on vaikutusta heilurin taajuuden lisäksi kokonaisenergiaan. Mikäli vartta pidennetään, niin geometrian perusteella joudumme nostamaan heiluria korkeammalle, mikäli haluamme päästää sen vapaaksi samasta kulmasta lyhyempivartisen heilurin kanssa.

5.4 JOUSEN ENERGIA

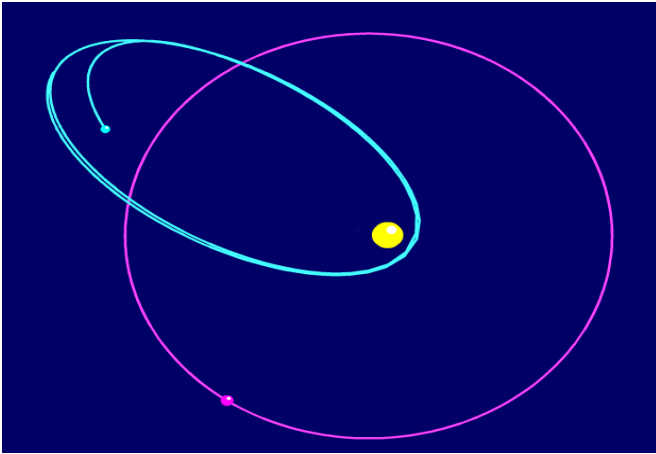


Punnukset ja jouset –simulaatio: Oppilaat osasivat selittää tyhjentävästi liike- ja potentiaalienergian roolin systeemeissä. Tutkimme, kuinka punnuksen massa ja jousen jäykkyys vaikuttavat kokonaisenergian määrään. Oppilaat päättelivät havaintojensa perusteella, että mitä raskaampi punnus ja mitä jäykempi jousi, sitä suurempi kokonaisenergia on.

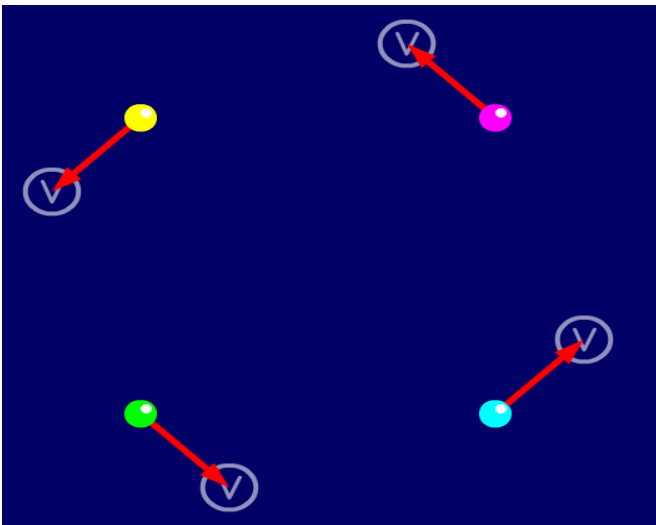
5.5 TAIVAANMEKANIikka JA ENERGIA



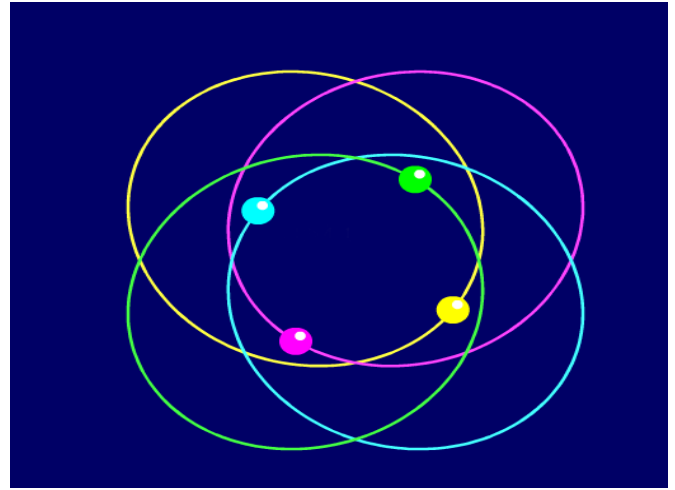
Taivaanmekaniikan simulaatio: Kuvassa Aurinko, planeetta ja komeetta. Ennen kuin oppilas käynnistää simulaation, nuolet osoittavat taivaankappaleiden alkunopeuksien suunnat ja suuruudet. Oppilaiden tehtävä oli ennustaa liikkeen jatkuminen, ennen kuin he käynnistivät simulaation.



Simulaatio käynnissä: Simulaatio piirtää Aurinkoa kiertävän komeetan ja planeetan liikeradat. Oppilaiden tehtävänä oli selvittää, milloin komeetan ja planeetan liike-energia on suurimmillaan ja milloin potentiaalienergia on suurimmillaan. Pohdimme myös, mitä tapahtuisi, jos esimerkiksi asteroidipilvi hidastaisi planeetan liikettä. Planeetan kokonaisenergia vähenisi ja planeetta siirtyisi lähemmäksi aurinkoa. Jos planeetta pysäytettäisiin täysin, se alkaisi pudota suoraan kohti aurinkoa ja lopulta tapahtuisi massiivinen törmäys. Jos taas planeetan liikettä hidastettaisiin tasaisella voimalla, planeetan rata olisi aurinkokeskeinen spiraali.

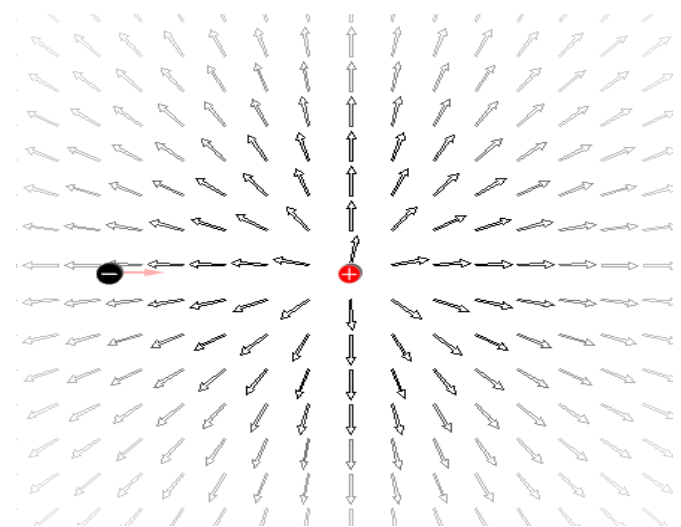


Kuvassa on neljän tähden systeemi ja tähtien alkunopeudet: Liikkeen ennustaminen oli mahdotonta ennen simulaation käynnistämistä. Useimmat oppilaat arvelivat tähtien rysähtävän kasaan. Tämä osoittaa painovoiman jonkin asteista ymmärrystä. Eräs vastaus oletti tähtien kiertävän "rinkiä" samalla radalla. Kukaan ei kuitenkaan olettautunut tähtien jatkavan suoraviivaista liikettä.



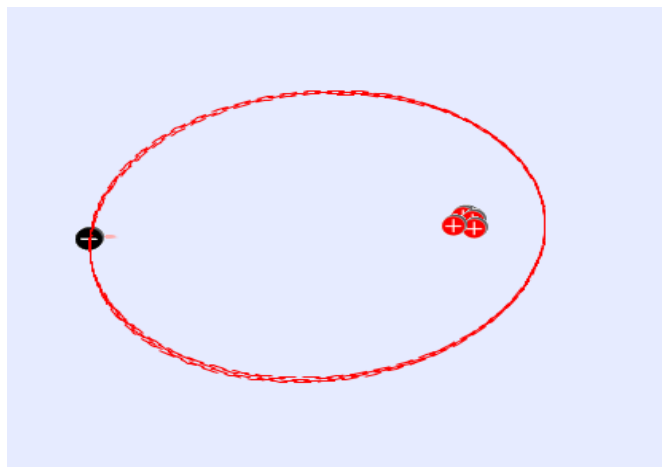
Simulaation käynnistämisen jälkeen muodostui sykkivä neljän tähden "baletti": Mietimme tilannetta systeemilähtöisesti, eli milloin neljän kappaleen systeemin potentiaalienergia on suurimmillaan ja milloin taas liike-energia. Oppilaat päättelivät nopeuksien perusteella, että tähtien ollessa lähimpänä toisiaan systeemin energia on kokonaan liike-energiaa. Tähtien ollessa kauimpana toisistaan kokonaisenergia jakaantuu sekä liike- että potentiaalienergiaksi. Taivaanmekaniikan simulaatio toi esiin energia-käsitteen universalisuutta ja osoittautui ehkä kaikista mielenkiintoisimmaksi simulaatioksi tässä opetuskokeilussa.

5.6 SÄHKÖINEN ENERGIA

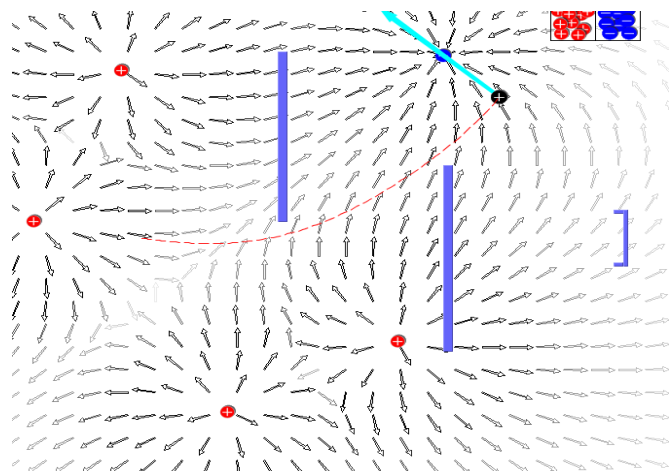


Sähköinen potentiaalienergia. Negatiivisella varauksella ennen "irti päästämistä" on positiivisen kiinnitetyn varauksen kentässä potentiaalienergiaa, koska sähköinen vetovoima vaikuttaa erimerkkisten varauksien välillä. Aivan kuten edellisessäkin simulaatiossa oppilaiden tehtävänä oli aluksi ennustaa negatiivisen varauksen liikerata, minkä jälkeen simulaatio käynnistettiin ja oppilaat tekivät havaintoja. Oppilaiden tehtä-

vänä oli verrata sähköisen voiman aiheuttamaa potentiaalienergiaa edellä esitelyihin simulaatioihin. Varauksen liike muistuttaa selkeästi heilureiden liikettä sekä skeittaajan liikettä painovoimakentässä.



Seuraavaksi mallinsimme aurinkoa kiertävää planeettaa varauksilla. Negatiiviselle varaukselle annettiin sivuttaissuuntainen nopeuden komponentti toisella negatiivisella varauksella, joka poistettiin tämän jälkeen systeemistä. Havaittiin, että negatiivinen varaus käyttäytyy kuten aurinkoa kiertävä planeetta. Sähköinen vetovoima on siis analoginen gravitaatiovuorovaikutuksen kanssa.



Lopuksi oppilaat saivat pelata sähköistä jääkiekkoa varauksilla. Tehtävänä oli rakentaa sähkökenttä, joka kuljettaa mustan negatiivisen kiekon kuvassa oikealla näkyvään maaliin esteiden taakse. Tarkoituksena oli konkretisoida kentän olemusta sekä kenttäviivojen merkitystä.

6 VIITTEET

1. Work,” *Phys. Teach.* **46**, 38–43 (Jan. 2008).
2. J.W. Jewett, “Energy and the confused student II: Systems,” *Phys. Teach.* **46**, 81–86 (Feb. 2008).
3. J.W. Jewett, “Energy and the confused student III: Language,” *Phys. Teach.* **46**, 149–153 (March 2008).
4. G.M. Barrow, “Thermodynamics should be build on energy – Not on Heat and Work,” *J. Chem. Educ.* **65**(2), 122–125 (feb 1988).
5. R.A. Serway and J.W. Jewett, *Physics for Scientists and Engineers*, 7th ed. (Brooks/Cole, Belmont, CA, 2008), pp. 239–240.
6. D. Keepers, “How does the potential energy of a rising helium-filled balloon change?” *Phys. Teach.* **40**, 164–165 (March 2002).
7. L.D. Landau and E.M. Lifshitz, *The Classical Theory of Fields* (Addison-Wesley, Reading, MA, 1965), p. 28. E. Hecht, “Energy and change,” *Phys. Teach.* **45**, 88–92 (Feb. 2007).
8. Frank Wilczek’s article “Mass without mass I: Most of matter,” *Phys. Today* **52**, 11 (Nov. 1999).