Hyvän vastauksen piirteet: FI – Fysiikka

22.9.2022

Alustavat hyvän vastauksen piirteet 22.9.2022

Alustavat hyvän vastauksen piirteet on suuntaa-antava kuvaus kokeen tehtäviin odotetuista vastauksista ja tarkoitettu ensisijaisesti tueksi alustavaa arvostelua varten. Alustavat hyvän vastauksen piirteet eivät välttämättä sisällä ja kuvaa tehtävien kaikkia hyväksyttyjä vastauksia. Alustavat hyvän vastauksen piirteet eivät ole osa Ylioppilastutkintolautakunnan yleisissä määräyksissä ja ohjeissa tarkoitettua tietoa siitä, miten arvosteluperusteita on sovellettu yksittäisen kokelaan koesuoritukseen. Alustavat hyvän vastauksen piirteet eivät sido Ylioppilastutkintolautakuntaa lopullisen arvostelun perusteiden laadinnassa.

Fysiikan ylioppilaskokeessa arvioinnin kohteita ovat lukion opetussuunnitelman perusteiden mukaisen fysiikan tiedon osaaminen ja soveltamisen taito. Kokeessa arvioidaan myös kokelaan kokeellisen tiedonhankinnan ja -käsittelyn taitoja. Näitä ovat muun muassa kokeensuunnittelu, yleisimpien mittavälineiden käytön hallinta, tulosten esittäminen ja tulkitseminen sekä johtopäätösten tekeminen. Kokeessa arvioidaan niin ikään kokelaan kykyä ymmärtää ja eritellä fysiikan luonteen mukaisia aineistoja. Arvioinnissa kiinnitetään huomiota siihen, että vastauksissa on käytetty fysiikan käsitteitä ja käsiterakenteita asianmukaisesti ja että vastaukset on esitetty selkeästi ja asiasisällön puolesta johdonmukaisesti ja hyvin jäsennellysti.

Hyvä vastaus sisältää vastauksen perustelut, ellei tehtävänannossa ole toisin mainittu. Siitä käy ilmi, että kokelas on tunnistanut oikein fysikaalisen ilmiön ja tarkastelee tilannetta fysikaalisesti mielekkäällä tavalla. Kokelas osaa kuvata sovellettavan fysikaalisen mallin ja perustella, miksi mallia voidaan käyttää kyseisessä tilanteessa. Kun vastaukseen liittyy tilannekuvioita, voimakuvioita, kytkentäkaavioita tai graafisia esityksiä, nämä on tehty selkeästi ja fysiikassa noudatettujen yleisten periaatteiden mukaisesti. Esimerkiksi voimakuviossa voimavektorit on erotettu vektorien komponenteista selkeästi.

Matemaattista käsittelyä vaativan tehtävän hyvässä vastauksessa on suureyhtälöt ja kaavat perusteltu tavalla, joka osoittaa kokelaan hahmottaneen tilanteen fysiikan kannalta oikein. Vastauksessa on esitetty tarvittavat laskut ja muut riittävät perustelut sekä lopputulos. Suureiden arvojen sijoituksia yhtälöön ei tarvitse kirjoittaa näkyviin, jos vastauksessa on selkeästi esitetty, mitä symbolia, lukuarvoa ja yksikköä kullekin suureelle käytetään. Symbolisten laskentaohjelmistojen avulla tehdyt ratkaisut hyväksytään, kunhan ratkaisusta käy ilmi, mihin tilanteeseen ja yhtälöihin ratkaisu symboleineen perustuu ja lopputuloksen yhteydessä on esitetty tehtävänannossa kysytyn suureen suhteen ratkaistu suureyhtälö.

Sisällys

Koe yhteensä	**120 p.**

Osa 1: 20 pisteen tehtävä

1. Monivalintatehtäviä fysiikan eri osa-alueilta 20 p.

Valitse jokaisessa osatehtävässä 1.1–1.10 parhaiten soveltuva vaihtoehto. Oikea vastaus 2 p., väärä vastaus 0 p., ei vastausta 0 p.

Osatehtävissä 1.1–1.3 tarkastellaan tilannetta, jossa lapsi hyppii trampoliinilla tehden jatkuvasti samanlaisia hyppyjä ilmaan.

1.1 Kun lapsen jalat koskettavat alastulossa trampoliinin pintaa, trampoliini alkaa hidastaa lapsen vauhtia. Mikä seuraavista väittämistä pätee tilanteessa? **2 p.**

- Lapsi ja trampoliini kohdistavat toisiinsa saman suuruiset voimat. (2 p.)

1.2 Trampoliinin venymä on suurimmillaan ja lapsen liikkeen suunta on juuri vaihtumassa. Mikä seuraavista väittämistä pätee tilanteessa? **2 p.**

- Trampoliinin lapseen kohdistama voima on suurempi kuin lapsen paino. (2 p.)

1.3 Lapsi on noussut ilmaan uuteen hyppyyn. Mikä seuraavista väittämistä kuvaa parhaiten lapsen liikettä trampoliinista irtoamisen jälkeen? **2 p.**

- Lapsen nopeus pienenee. (2 p.)

1.4 Kun kaksi metallikappaletta on kosketuksissa toistensa kanssa, havaitaan että niiden välillä ei siirry energiaa lämpönä. Mikä seuraavista väittämistä pitää **varmasti** paikkansa tilanteessa? **2 p.**

- Kappaleilla on sama lämpötila. (2 p.)

1.5 Mitä eroa on veden kiehumisella ja veden höyrystymisellä? **2 p.**

- Kiehumista tapahtuu vain kiehumispisteessä, höyrystymistä myös alemmissa lämpötiloissa. (2 p.)

1.6 Miten sähköstaattinen pölyhuiska saa sähkövarauksensa? **2 p.**

- Huiskan kuidut hankaavat toisiaan ja puhdistettavaa pintaa, mikä aiheuttaa varautumisen. (2 p.)

1.7 Miksi sähköstaattinen pölyhuiska vetää puoleensa ilmassa leijuvia pölyhiukkasia? **2 p.**

- Huiska saa sähkövaraukset jakautumaan pölyhiukkasissa epätasaisesti. (2 p.)

1.8 Pienellä nappimagneetilla voi kiinnittää jääkaapin oveen yhden paperiarkin mutta ei kymmenen paperiarkin nippua. Mikä seuraavista on merkittävin syy tähän? **2 p.**

- Nappimagneetin magneettikenttä heikkenee nopeasti etäisyyden kasvaessa. (2 p.)

1.9 Auringonvalo osuu metallilevyyn lämmittäen sitä. Mikä seuraavista väittämistä pitää paikkansa energian siirtyessä valosta metallilevyyn? **2 p.**

- Energiaa siirtyy kvantteina, joiden suuruuden määrää säteilyn aallonpituus. (2 p.)

1.10 Mikä seuraavista väittämistä pätee atomiytimen radioaktiivisessa hajoamisessa? **2 p.**

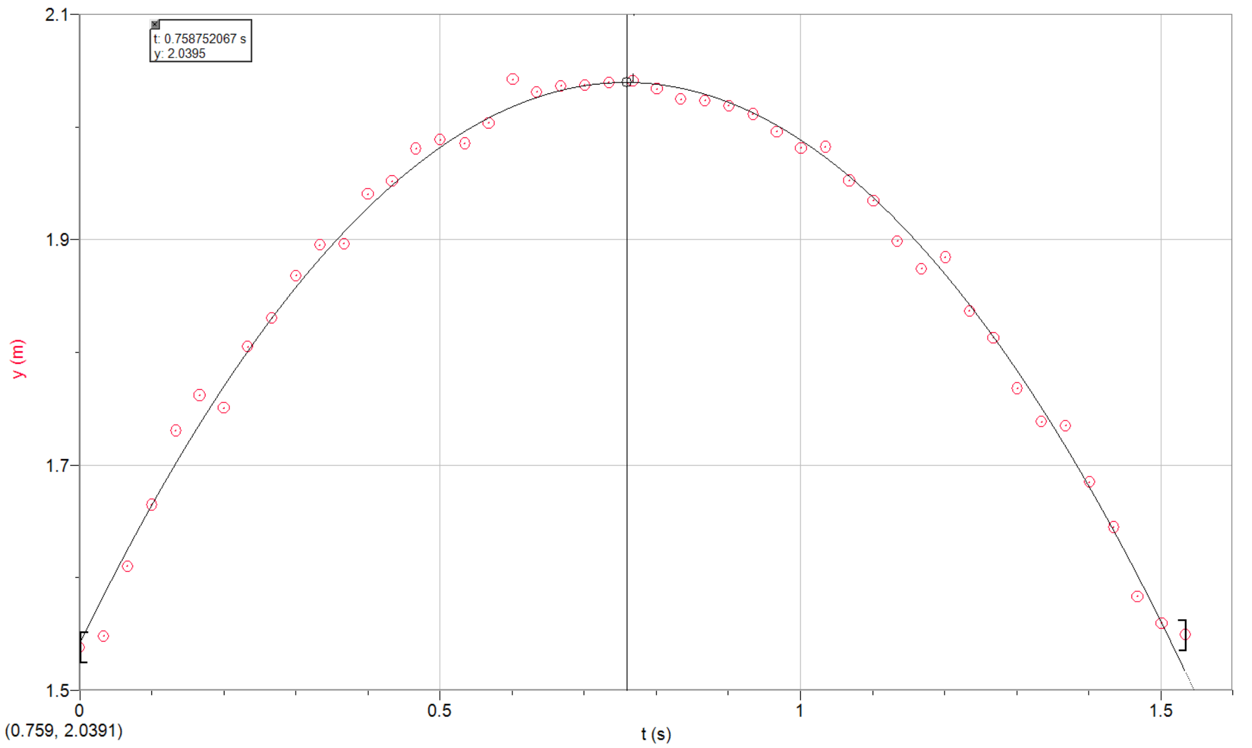
- Kokonaissähkövaraus, kokonaisenergia ja kokonaisliikemäärä säilyvät. (2 p.)

Osa 2: 15 pisteen tehtävät

2. Astronautin hyppy 15 p.

Astronautti John Young hyppäsi vuonna 1972 Kuun pinnalla lähes pystysuoran hypyn ylöspäin. Videoidusta hypystä (video 2.A) määritettiin astronautin repun yläosan etäisyys Kuun pinnasta ajan funktiona (mittausaineisto 2.B).

2.1 Laadi graafinen esitys määritetystä etäisyydestä ajan funktiona. Esityksessä tulee näkyä mittauspisteet ja niihin sopiva, fysikaalisen mallin mukainen sovite. Mistä liikkeen mallista on kyse? **7 p.**



Ainoa astronauttiin kohdistuva voima on Kuun painovoima, joka on vakio. Liikettä voidaan kuvata tasaisesti kiihtyvän liikkeen mallilla, jota esittää toisen asteen yhtälö $y = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + y_0$. Sovitus mittauspisteisiin antaa kuvaajaksi paraabelin

$$y = (-0{,}8672\ \mathrm{m/s^2})t^2 + (1{,}314\ \mathrm{m/s})t + 1{,}542\ \mathrm{m}.$$

(7 p.)

2.2 Millä ajanhetkellä John Young on hyppynsä korkeimmassa kohdassa? **2 p.**

Kuvaajan korkein kohta on paraabelin huippukohdassa. Aineiston perusteella John Young on hypyn korkeimmassa kohdassa, kun $t = 0,76$ s. Sama tulos saadaan myös derivoimalla sovitetta ja ratkaisemalla nollakohta:

$$\frac{dy}{dt} = 2 \cdot (-0{,}8672\ \mathrm{m/s^2})t + 1{,}314\ \mathrm{m/s} = 0,$$

joten

$$t = \frac{1{,}314\ \mathrm{m/s}}{1{,}7344\ \mathrm{m/s^2}} = 0{,}758\ \mathrm{s}.$$

(2 p.)

2.3 Määritä aineiston perusteella putoamiskiihtyvyys Kuun pinnalla. **6 p.**

Putoamiskiihtyvyys voidaan saada sovitteesta usealla tavalla, esimerkiksi:

1. Aineistoon sopii sovite
$$y(t) = (-0{,}8672\ \mathrm{m/s^2})t^2 + (1{,}314\ \mathrm{m/s})t + 1{,}542\ \mathrm{m}.$$
Kun tätä verrataan tasaisesti kiihtyvän liikkeen yhtälöön $y = \frac{1}{2}at^2 + v_0 t + y_0$, havaitaan, että
$$\frac{1}{2}a = -0{,}8672\ \mathrm{m/s^2}.$$
(3 p.)

   Näin siis putoamiskiihtyvyyden suuruus Kuun pinnalla on aineiston perusteella
$$g_{\mathrm{Kuu}} = 1{,}7\ \mathrm{m/s^2}.$$
(3 p.)

2. Määritetään alkunopeus sovituksen kohdasta $t = 0\ \mathrm{s}$: $v_0 = 1{,}314\ \mathrm{m/s}$.
(3 p.)

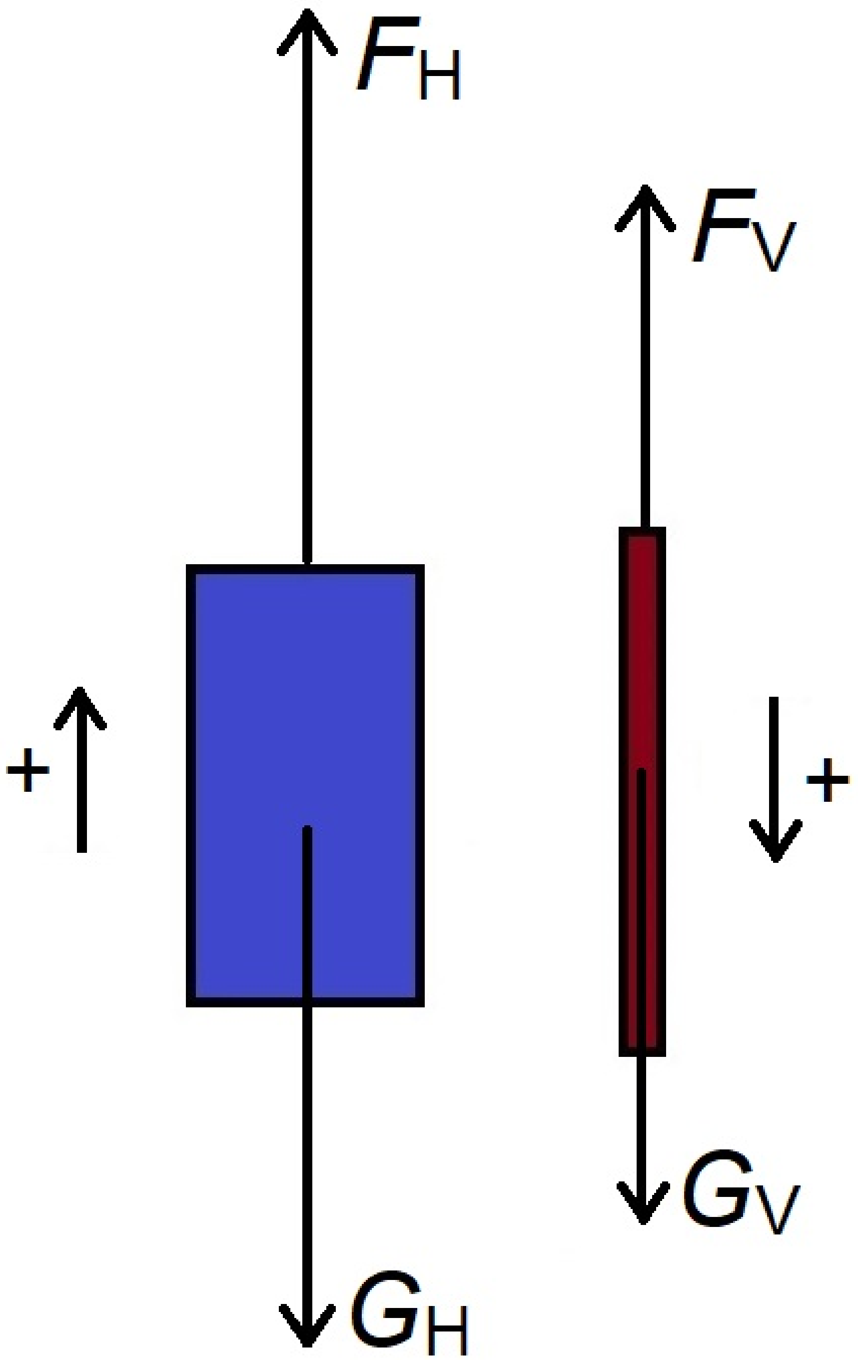
   Nopeus v on alkunopeuden, kiihtyvyyden ja ajan funktio:
$$v = v_0 - g_{\mathrm{Kuu}}t.$$
Lakipisteessä nopeus $v = 0$, ja aineiston perusteella lakipiste saavutetaan hetkellä $t = 0{,}758\ \mathrm{s}$, joten
$$g_{\mathrm{Kuu}} = \frac{v_0}{t} = \frac{1{,}314\ \mathrm{m}}{0{,}758\ \mathrm{s}} = 1{,}7\ \mathrm{m/s^2}.$$
(3 p.)

3. Vastapainohissi **15 p.**

Kuva 3.A esittää yksinkertaista vastapainohissiä. Hissikorin ja siinä olevan kuorman yhteismassa on 830 kg ja vastapainon massa 670 kg. Hissikorin ja vastapainon yhdistävä vaijeri ei pääse liukumaan sähkömoottorin akselilla olevalla vetopyörällä. Hissi lähtee liikkeelle ylöspäin, ja sen nopeus kasvaa 1,2 sekunnissa tasaisesti nollasta arvoon 1,6 m/s.

3.1 Määritä hissivaijerin hissikoriin ja vastapainoon kiihdytyksen aikana kohdistamat voimat. **9 p.**

Valitaan positiiviset suunnat oheisen kuvan mukaisesti. Hissikoriin vaikuttavat painovoima G_{H} ja vaijerin jännitysvoima F_{H} ja vastapainoon painovoima G_{V} ja vaijerin jännitysvoima F_{V}. Hissin nopeudet hetkillä $t_1 = 0$ ja $t_2 = 1{,}2\ \mathrm{s}$ ovat vastaavasti $v_1 = 0$ ja $v_2 = 1{,}6\ \mathrm{m/s}$, joten hissikorin ja vastapainon kiihtyvyydeksi saadaan
$$a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = 1{,}333\ \mathrm{m/s^2}.$$
(3 p.)



Hissikorin ja sen sisältämän kuorman yhteismassa on $m_{\mathrm{H}} = 830\ \mathrm{kg}$ ja vastapainon massa $m_{\mathrm{V}} = 670\ \mathrm{kg}$. Newtonin II lain perusteella

$$m_{\mathrm{H}} a = F_{\mathrm{H}} - G_{\mathrm{H}}$$

ja

$$m_{\mathrm{V}} a = G_{\mathrm{V}} - F_{\mathrm{V}}.$$

Putoamiskiihtyvyys on $g = 9{,}81\ \mathrm{m/s^2}$ ja painot $G_{\mathrm{H}} = m_{\mathrm{H}} g$ ja $G_{\mathrm{V}} = m_{\mathrm{V}} g$. Vaijerin jännitysvoimiksi saadaan

$$F_{\mathrm{H}} = m_{\mathrm{H}}(g + a) = 9\ 249\ \mathrm{N} \approx 9{,}2\ \mathrm{kN}$$

ja

$$F_{\mathrm{V}} = m_{\mathrm{V}}(g - a) = 5\ 680\ \mathrm{N} \approx 5{,}7\ \mathrm{kN}.$$

(6 p.)

3.2 Kuinka suuria ovat hissin nopeus ja moottorin tuottama mekaaninen teho, kun hissin liikkeellelähdöstä on kulunut 0,80 sekuntia? **6 p.**

Hetkellä $t = 0{,}80\ \mathrm{s}$ hissikorin ja vastapainon nopeus on $v = at = 1{,}066\ \mathrm{m/s}$. Moottorin mekaaninen teho on $P = P_{\mathrm{H}} + P_{\mathrm{V}}$, jossa $P_{\mathrm{H}} = F_{\mathrm{H}} v$ ja $P_{\mathrm{V}} = -F_{\mathrm{V}} v$ ovat vastaavasti vaijerin hissikoriin ja vastapainoon kohdistamien voimien tehot. Siis

$$P = (F_{\mathrm{H}} - F_{\mathrm{V}})v = 3\ 805\ \mathrm{W} \approx 3{,}8\ \mathrm{kW}.$$

> (6 p.)

4. Kirurginen polttolaite **15 p.**

Kirurgista diatermialaitetta eli polttolaitetta käytetään muun muassa luomien poistossa sekä verenvuotojen tyrehdyttämisessä. Polttoprosessissa laitteella johdetaan korkeataajuuksista vaihtovirtaa kudosalueen läpi, jolloin kudos käyttäytyy vaihtovirran korkean taajuuden takia vastuksen tavoin. Kuvassa 4.A on esitetty bipolaarinen diatermialaite. Tarkastellaan kirurgista toimenpidettä, jossa käytettävä diatermialaite tuottaa sinimuotoista vaihtovirtaa 58 watin teholla.

4.1 Toimenpiteessä lämmitetään ensin 1,1 g kudosnestettä ruumiinlämmöstä (37 °C) kiehumispisteeseen. Tämän jälkeen 0,40 g tästä kudosnesteestä höyrystyy. Kuinka kauan toimenpide kestää? Kudosneste on pääosin vettä. **7 p.**

> Kudosnesteen lämmittämiseen ja höyrystämiseen tarvitaan energia
>
> $$Q = c_{\text{vesi}} m_1 \Delta T + r_{\text{vesi}} m_2,$$
>
> jossa $m_1 = 1{,}1 \cdot 10^{-3} kg, m_2 = 0{,}40 \cdot 10^{-3} kg$ ja $\Delta T = 63\,\text{K}.$ (2 p.)
> Aika saadaan tehon suureyhtälöstä $P = Q/t$: (2 p.)
>
> $$t = \frac{Q}{P} = \frac{c_{\text{vesi}} m_1 \Delta T + r_{\text{vesi}} m_2}{P} = \frac{4\ 190 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot 1{,}1 \cdot 10^{-3}\,\text{kg} \cdot 63\,\text{K} + 2{,}26 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot 0{,}40 \cdot 10^{-3}\,\text{kg}}{58\,\text{W}} = 20{,}6\,s \approx 21\,s.$$
>
> (3 p.)

4.2 Tehollinen sähkövirta kudoksessa on 0,45 ampeeria. Kuinka suuri on jännitteen huippuarvo? **5 p.**

> Annetulle teholle pätee $P = UI$, jossa I on tehollinen virta. Tehollinen jännite on tällöin $U = P/I$. Koska kyseessä on sinimuotoinen vaihtovirta, niin tehollinen jännite on $U = u_0/\sqrt{2}$, jossa u_0 on jännitteen huippuarvo. Jännitteen huippuarvo on
>
> $$u_0 = \sqrt{2}\,U = \sqrt{2}\,\frac{P}{I} = \sqrt{2} \cdot \frac{58\,\text{W}}{0{,}45\,\text{A}} = 182{,}3\,\text{V} \approx 180\,\text{V}.$$
>
> (5 p.)

4.3 Kuinka suuri on poltettavan kudosalueen resistanssi toimenpiteen aikana? **3 p.**

> Resistanssi on
>
> $$R = \frac{U}{I} = \frac{P}{I^2} = \frac{58\,\text{W}}{(0{,}45\,\text{A})^2} = 286\,\Omega \approx 290\,\Omega.$$
>
> (3 p.)

5. Varatut kuulat **15 p.**

Kaksi identtistä pientä sähköisesti varattua alumiinikuulaa pidetään aluksi 0,10 metrin etäisyydellä toisistaan. Kuulat vetävät toisiaan puoleensa 1,0 newtonin voimilla. Kuulien annetaan koskettaa toisiaan, minkä jälkeen ne siirretään takaisin 0,10 metrin etäisyydelle. Kuulien väliset voimat ovat edelleen 1,0 newtonia, mutta nyt kuulat hylkivät toisiaan.

5.1 Miksi kuulat vetävät toisiaan puoleensa ennen kosketusta? Miksi kosketus saa kuulat hylkimään toisiaan? **7 p.**

> Coulombin lain mukaan kaksi varattua kappaletta vetävät toisiaan puoleensa, jos niiden varaukset ovat erimerkkiset. Kuulien varaukset siis ovat ennen kosketusta erimerkkiset. Kuulat ovat identtiset, ja ne johtavat sähköä, joten varaukset jakautuvat kosketuksessa tasan niiden kesken. Kuulat hylkivät toisiaan kosketuksen

> jälkeen, koska kosketuksen jälkeen niiden varaukset ovat samanmerkkiset. Koska kuuliin jää varausta, niiden varaukset ennen kosketusta eivät olleet yhtä suuria.

5.2 Määritä, mitkä olivat kuulien varaukset ennen kuin kuulat koskettivat toisiaan. **8 p.**

> Kuulien alkuperäiset varaukset olkoot q_1 ja q_2. Sovelletaan Coulombin lakia kaksi kertaa. Ennen kosketusta kuulat vaikuttavat toisiinsa voimalla
> $$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 d^2},$$
> jossa tulo $q_1 q_2$ on negatiivinen. Kosketuksen jälkeen nettovaraus jakautuu tasan kuulien kesken eli kummankin kuulan varaus on $q = (q_1 + q_2)/2$. Varauksen etumerkkiä ei tunneta. Kosketuksen jälkeen kuulat kohdistavat toisiinsa voiman
> $$F' = \frac{(q_1 + q_2)^2}{16\pi\varepsilon_0 d^2}.$$
> Voimat F ja F' ovat vastakkaissuuntaiset ja yhtä suuret, joten
> $$\frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 d^2} = -\frac{(q_1 + q_2)^2}{16\pi\varepsilon_0 d^2}.$$
> Ratkaistaan toisen asteen yhtälö, jolloin varauksien välille saadaan yhtälö
> $$q_1 = (-3 \pm 2\sqrt{2})q_2.$$
> Sijoitetaan varauksen q_1 lauseke Coulombin lakiin ja ratkaistaan q_2:
> $$q_2 = \pm\sqrt{\frac{4\pi\varepsilon_0 d^2 F}{-3 \pm 2\sqrt{2}}}.$$
> Sijoitetaan lukuarvot $F = -1,00\,\mathrm{N}$ ja $d = 0,100\,\mathrm{m}$. Vastaavat varauksen q_1 arvot saadaan laskettua yllä esitetyn yhtälön avulla.
>
> Kun neliöjuurelle valitaan positiivinen etumerkki, saadaan
> $q_1 = \ -0{,}44\ \mu\mathrm{C}$ ja $q_2 = 2{,}55\ \mu\mathrm{C}$
> tai $q_1 = \ -2{,}55\ \mu\mathrm{C}$ ja $q_2 = 0{,}44\ \mu\mathrm{C}$
> Kun neliöjuurelle valitaan negatiivinen etumerkki, saadaan
>
> $q_1 = \ 0{,}44\ \mu\mathrm{C}$ ja $q_2 = -2{,}55\ \mu\mathrm{C}$
> $q_1 = \ 2{,}55\ \mu\mathrm{C}$ ja $q_2 = -0{,}44\ \mu\mathrm{C}$.
>
> (8 p.)

6. Sähkömagneettinen induktio **15 p.**

Kaikissa alla olevissa tapauksissa 6.1–6.5 neliön muotoinen johdinsilmukka on äärellisen kokoisessa homogeenisessa magneettikentässä. Valitse kussakin tapauksessa 6.1–6.5 se aineiston 6.A kuvaaja A–H, joka parhaiten kuvaa silmukkaan indusoituvaa sähkövirtaa ajan funktiona. Kukin aineiston kuvaajista voi olla oikea vastaus yhteen, useampaan tai ei yhteenkään osatehtävään.

6.1 Silmukkaa pyöritetään vakiokulmanopeudella silmukan pyörimisakselin ollessa kohtisuorassa kenttää vastaan. **3 p.**

- A (3 p.)

6.2 Silmukkaa pyöritetään vakiokulmanopeudella silmukan pyörimisakselin ollessa kentän suuntainen. **3 p.**

- H (3 p.)

6.3 Silmukka on alussa paikallaan magneettikentän alueella. Silmukka päästetään putoamaan vapaasti nuolen suuntaan. **3 p.**

- F (3 p.)

6.4 Silmukka on paikallaan. Magneettikenttä häviää äkillisesti. **3 p.**

- G (3 p.)

6.5 Silmukka on paikallaan. Magneettikentän magneettivuon tiheys vuoron perään kasvaa ja heikkenee tasaisesti. **3 p.**

- C (3 p.)

7. Peltipurkkipuhelin **15 p.**

Kuvassa 7.A on esitetty yksinkertaisen peltipurkkipuhelimen rakenne. Vastaavanlainen peltipurkkipuhelin rakennettiin käyttäen kahta peltipurkkia ja 75 metriä pitkää messinkilankaa. Äänen vaimeneminen liitoskohdissa ja langassa saatiin pieneksi pitämällä puhelimen lanka kireällä, jolloin puhuja ja kuulija olivat 75 metrin etäisyydellä toisistaan.

7.1 Millaisena mekaanisena aaltoliikkeenä ääni etenee peltipurkkipuhelimen langassa? **2 p.**

> Ääni etenee pitkittäisenä aaltoliikkeenä.
> (2 p.)

7.2 Äänen nopeudelle ohuessa messinkilangassa pätee yhtälö $v = \sqrt{E/\rho}$, jossa $E = 10{,}5 \cdot 10^{10}\ \mathrm{N/m^2}$ on messingin kimmokerroin ja $\rho = 8{,}4 \cdot 10^3\ \mathrm{kg/m^3}$ tiheys. Äänen nopeus ilmassa (lämpötila 20 °C) on $v_{\text{ilma}} = 343\ \mathrm{m/s}$.

Kuinka paljon aiemmin ääni saavuttaa kuulijan, kun käytetään peltipurkkipuhelinta pelkän huutamisen sijaan? Peltipurkkien pituuksia ei tarvitse huomioida.

4 p.

> Äänen nopeus ohuessa messinkilangassa lasketaan käyttäen yhtälöä $v = \sqrt{E/\rho}$, jossa $\rho = 8{,}4 \cdot 10^3$ kg/m^3 ja $E = 10{,}5 \cdot 10^{10}$ N/m^2. Äänen nopeus ilmassa $(20\ ^\circ\mathrm{C})$ on $v_{\text{ilma}} = 343$ m/s.
> Ääniaallot etenevät yhtä pitkän matkan ilmassa ja messinkilangassa:
> $$x = v_{\text{ilma}} t_{\text{ilma}} = v t_{\text{messinki}}.$$
> Peltipurkkien pituudet voidaan olettaa mitättömiksi, joten matka on yhtä pitkä kuin messinkilanka eli $x = 75$ m.
> Matka-aikojen $t_{\text{ilma}} = x/v_{\text{ilma}}$ ja $t_{\text{messinki}} = x/v$ erotus on
> $$\Delta t = t_{\text{ilma}} - t_{\text{messinki}} = \frac{x}{v_{\text{ilma}}} - \frac{x}{v} = x\left(\frac{1}{v_{\text{ilma}}} - \frac{1}{v}\right).$$
> Sijoittamalla äänen nopeus messinkilangassa saadaan
> $$\Delta t = x\left(\frac{1}{v_{\text{ilma}}} - \frac{1}{\sqrt{E/\rho}}\right) = x\left(\frac{1}{v_{\text{ilma}}} - \sqrt{\frac{\rho}{E}}\right),$$
> jolloin
> $$\Delta t = 75\ \mathrm{m}\left(\frac{1}{343\ \mathrm{m/s}} - \sqrt{\frac{8{,}4 \cdot 10^3\ \mathrm{kg/m^3}}{10{,}5 \cdot 10^{10}\ \mathrm{N/m^2}}}\right) = 0{,}197446\ \mathrm{s} \approx 0{,}20\ \mathrm{s}.$$
> Ääni saavuttaa kuulijan 0,20 s nopeammin peltipurkkipuhelimen avulla kuin huutamalla.
> (4 p.)

7.3 Peltipurkkipuhelimessa ääni vaimenee merkittävästi ainoastaan messinkilangassa tapahtuvan absorption takia. Vaimenemiselle pätee yhtälö $I = I_1 e^{-\alpha x}$, jossa I_1 on äänen intensiteetti lähteessä, I on äänen intensiteetti etäisyydellä x lähteestä ja $\alpha = 0{,}086\ \mathrm{m^{-1}}$ on messinkilangassa etenevän äänen vaimenemiskerroin.

Puhujan äänen intensiteettitaso on 72 dB puhujan peltipurkin pohjan kohdalla 7,0 cm:n etäisyydellä puhujan suusta. Laske äänen intensiteettitaso kuulijan peltipurkin pohjan kohdalla. Laske myös äänen intensiteettitaso 75 m:n etäisyydellä, jos puhuja puhuu samalla äänen voimakkuudella ilman peltipurkkipuhelinta. Äänen vaimeneminen ilmassa absorption takia voidaan jättää huomiotta. Vertaile tuloksia keskenään.

9 p.

Äänen intensiteettitaso L määritellään äänen kuulokynnyksen intensiteetin (I_0) avulla:

$$L = 10\ \lg \frac{I}{I_0}$$

Kun ääni on edennyt messinkilangassa matkan $x = 75$ m, sen intensiteetti on

$$I_2 = I_1 e^{-\alpha x}.$$

jossa I_1 on alkuperäinen intensiteetti ja $\alpha = 0{,}086\ \mathrm{m}^{-1}$ on messinkilangassa etenevän äänen vaimenemiskerroin.

Vaimennetun äänen intensiteettitaso voidaan laskea käyttäen ensimmäistä yhtälöä:

$$L_2 = 10\ \lg \frac{I_2}{I_0} = 10\ \lg\left(\frac{I_1 e^{-\alpha x}}{I_0}\right) = 10\ \lg\left(\frac{I_1}{I_0} \cdot e^{-\alpha x}\right) = 10\ \lg\left(\frac{I_1}{I_0}\right) + 10\ \lg\left(e^{-\alpha x}\right)$$
$$= L_1 + 10\ \lg\left(e^{-\alpha x}\right).$$

L_1 on alkuperäisen äänen intensiteettitaso (72 dB), joten vaimennetun äänen intensiteettitaso on

$$L_2 = 72\ \mathrm{dB} + 10\ \lg\left(e^{-0{,}086 \frac{1}{\mathrm{m}} \cdot 75\ \mathrm{m}}\right) \mathrm{dB} = 43{,}9880\ \mathrm{dB} \approx 44\ \mathrm{dB}.$$

(4 p.)

Ääni etenee ilmassa palloaaltona, joten äänen intensiteetti on kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön, $I \sim 1/r^2$, eli $I = k\frac{1}{r^2}$, jossa k on verrannollisuuskerroin.

Alkuperäisen ja vaimennetun äänen suhde on siten

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{k\frac{1}{r_1^2}}{k\frac{1}{r_2^2}} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2,$$

jolloin vaimennetun äänen intensiteetti on $I_2 = I_1/\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$.

Vaimennetun äänen intensiteettitaso voidaan näin ollen laskea samalla tavalla kuin aikaisemmin:

$$L_2 = 10\ \lg \frac{I_2}{I_0} = 10\ \lg\left(\frac{I_1/\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2}{I_0}\right) = 10\ \lg\left(\frac{I_1}{I_0} \cdot \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2}\right) = 10\ \lg\left(\frac{I_1}{I_0}\right) - 10\ \lg\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$$
$$= L_1 - 20\ \lg\left(\frac{r_2}{r_1}\right).$$

Alkuperäisen äänen intensiteettitaso etäisyydellä $r_1 = 7{,}0$ cm oli $L_1 = 72$ dB, jolloin intensiteettitaso etäisyydellä $r_2 = 75$ m on

$$L_2 = 72\ \mathrm{dB} - 20\ \lg\left(\frac{75\ \mathrm{m}}{0{,}07\ \mathrm{m}}\right)\ \mathrm{dB} = 11{,}4007\ \mathrm{dB} \approx 11\ \mathrm{dB}.$$

Äänen intensiteettitaso kuulijan kohdalla on suurin piirtein sama kuin ihmisen hengityksen intensiteettitaso (noin 10 dB), kun puhuja puhuu ilman peltipurkkipuhelinta, eli 11 dB. Peltipurkkipuhelimen avulla intensiteettitaso on 44 dB, eli ääni saavuttaa kuulijan suunnilleen samalla intensiteettitasolla kuin hiljainen puhe (noin 40 dB).

(5 p.)

8. Hiiliajoitus 15 p.

Hiili esiintyy luonnossa kahtena pysyvänä isotooppina ^{12}C ja ^{13}C sekä radioaktiivisena isotooppina ^{14}C. Ilmakehässä isotoopin ^{12}C lukumääräosuus on 98,9 % ja isotoopin ^{13}C lukumääräosuus on 1,1 %. Isotoopin ^{14}C osuus kaikesta ilmakehän hiilestä on $1{,}2 \cdot 10^{-12}$, ja isotoopin puoliintumisaika on 5 730 vuotta.

8.1 Isotooppi ^{14}C syntyy ilmakehässä, kun typpiydin ^{14}N sieppaa kosmisen säteilyn synnyttämän neutronin ja säteilee samalla protonin. ^{14}C hajoaa β^--hajoamisella. Kirjoita isotoopin ^{14}C syntymisen ja hajoamisen reaktioyhtälöt.

4 p.

Reaktioyhtälöt:

$$^1_0\mathrm{n} + ^{14}_{7}\mathrm{N} \rightarrow ^{14}_{6}\mathrm{C} + ^1_1\mathrm{p},$$

$$^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow ^{14}_{7}\mathrm{N} + ^{0}_{-1}\mathrm{e}^- + ^0_0\bar{\nu}_e.$$

(4 p.)

8.2 Arkeologisten orgaanisten näytteiden, kuten nuotiohiilien ja eläinten luiden, ikä voidaan arvioida näytteessä olevien hiilen isotooppien avulla. Selitä lyhyesti, mihin tämä radiohiiliajoitus perustuu. **4 p.**

Hiilen kolmen isotoopin osuudet ilmakehässä pysyvät kutakuinkin muuttumattomina. Ilmakehän hiili päätyy kasveihin niiden yhteyttäessä ja kasveista edelleen niitä syöviin eläimiin. Radioaktiivisen isotoopin osuus ei ehdi kasvin tai eläimen elinaikana pienentyä merkittävästi radioaktiivisen hajoamisen takia, joten kasvin tai eläimen kuollessa siinä on hiilen isotooppeja samassa suhteessa kuin ilmakehässä. Kuoleman jälkeen isotoopin ^{14}C määrä pienenee ajan kuluessa eksponentiaalisesti radioaktiivisen hajoamisen takia, mutta pysyvien isotooppien ^{12}C ja ^{13}C määrät eivät muutu.

Kasvin tai eläimen kuolemasta kulunut aika voidaan määrittää mittaamalla isotooppien lukumääräsuhde. Myös näytteen aktiivisuus pienenee eksponentiaalisesti, joten näytteen ikä voidaan määrittää myös mittaamalla näytteen aktiivisuus.

(4 p.)

8.3 Eräästä Itä-Suomessa sijaitsevasta kivikautisesta asuinpaikasta löytyi kaivauksissa nisäkkään luu, jolle tehtiin massaspektrometrillä hiilen isotooppisuhteiden määritys. Isotooppien ^{14}C ja ^{13}C lukumääräsuhteeksi saatiin $3{,}5 \cdot 10^{-11}$. Arvioi, kuinka kauan aikaa sitten asuinpaikkaa käytettiin. **7 p.**

Hiilen isotoopin ^{14}C lukumäärä $N(^{14}\mathrm{C})$ kuolleen nisäkkään luunäytteessä pienenee radioaktiivisen hajoamisen takia, ja ajan t kuluttua nisäkkään kuolemasta se on

$$N(^{14}\mathrm{C}) = N_0(^{14}\mathrm{C})e^{-(\ln 2/T_{1/2})t},$$

jossa $N_0(^{14}\mathrm{C})$ on isotoopin ^{14}C lukumäärä nisäkkään kuollessa ja $T_{1/2}$ on isotoopin ^{14}C puoliintumisaika. Isotooppien ^{14}C ja ^{13}C lukumääräsuhde on näin

$$\frac{N(^{14}\mathrm{C})}{N(^{13}\mathrm{C})} = \frac{N_0(^{14}\mathrm{C}) \cdot e^{-(\ln 2/T_{1/2})t}}{N_0(^{13}\mathrm{C})},$$

jossa $N_0(^{13}\mathrm{C})$ on isotoopin lukumäärä näytteessä nisäkkään kuollessa. Lukumääräsuhde nisäkkään kuollessa $N_0(^{13}\mathrm{C})/N_0(^{14}\mathrm{C})$ oli yhtä suuri kuin isotooppien ^{14}C ja ^{13}C lukumääräsuhde ilmakehässä.
(4 p.)

Lukumääräsuhteeksi saatiin mittauksissa $3,5 \cdot 10^{-11}$, joten näytteen iäksi saadaan ($T_{1/2} = 5\,730\,\mathrm{a}$)

$$\begin{aligned} t &= -\frac{T_{1/2}}{\ln 2}\ln\left(\frac{N_0(^{13}\mathrm{C})}{N_0(^{14}\mathrm{C})} \cdot \frac{N(^{14}\mathrm{C})}{N(^{13}\mathrm{C})}\right) \\ &= -\frac{5\ 730\,\mathrm{a}}{\ln 2}\ln\left(\frac{1,1 \cdot 10^{-2}}{1,2 \cdot 10^{-12}} \cdot 3,5 \cdot 10^{-11}\right) \simeq 9400\,\mathrm{a}. \end{aligned}$$

Asuinpaikkaa käytettiin noin 9400 vuotta sitten.

(3 p.)

Osa 3: 20 pisteen tehtävät

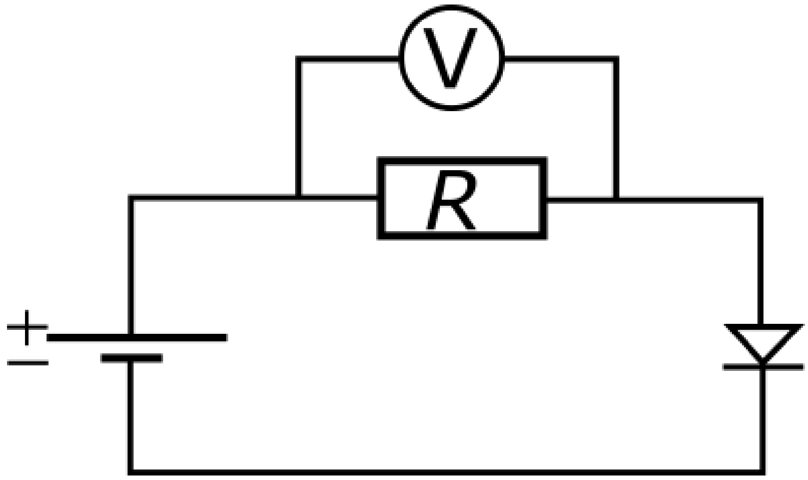
9. Diodi **20 p.**

9.1 Kerro, kuinka diodi käyttäytyy virtapiirissä. Mihin diodeja käytetään? **6 p.**

Diodi päästää lävitseen sähkövirtaa päästösuuntaan, kun sille ominainen kynnysjännite ylitetään. Ideaalinen diodi ei päästä läpi sähkövirtaa estosuuntaan. Jännitehäviö päästösuuntaan kytketyssä ideaalisessa diodissa on

> kynnysjännitteen suuruinen, mikäli diodin läpi kulkee sähkövirtaa. Diodeja käytetään esimerkiksi jännitteen tasasuuntaukseen (Zener-diodeja referenssijännitteen luomiseen) ja ledejä merkkivaloina tai valaistuksessa.

9.2 Suunnittele ja kuvaile mittaus, jolla voit määrittää tuntemattoman diodin ominaiskäyrän. Sinulla on käytössäsi diodin lisäksi johtimia, jännitemittari, välillä 0–5 V säädettävä tasajännitelähde sekä useita erilaisia vastuksia, joiden resistanssit tunnetaan. Millaisen ominaiskäyrän oletat saavasi tulokseksi? **14 p.**

> Diodin ominaiskäyrä on diodin läpi kulkeva sähkövirta diodin jännitehäviön funktiona. Pitää siis saada diodin yli erilaisia jännitteitä ja mitata sen läpi menevä sähkövirta.
>
> Rakennetaan virtapiiri, jossa on jännitelähde (jännite U), vastus (resistanssi R) ja diodi. Jännitemittarilla mitataan vastuksen jännitehäviö (mitattu jännite U_R), jotta saadaan määritettyä virtapiirin sähkövirta. Oletetaan, että jännitelähteen jännitettä ei tarvitse mitata. Tarvittaessa sen voisi mitata jännitemittarilla.
>
> 
>
>
> (6 p.)
>
> Ominaiskäyrä mitataan noin välillä -5 V – 5 V. Kuvan virtapiirillä voidaan mitata väli 0 V – 5 V (päästösuunta). Kääntämällä joko diodi tai jännitelähde vidaan mitata väli -5 V – 0 V (estosuunta). Ohmin lain mukaan vastuksen ja diodin läpi kulkeva sähkövirta on
>
> $$I = U_\mathrm{R}/R.$$
>
> Diodin jännitehäviö on
>
> $$U_\mathrm{d} = U - U_\mathrm{R}.$$
>
> Vaihtoehtoisesti jännite U_d voidaan myös mitata suoraan jännitemittarilla esim. virranmäärityksen jälkeen.
>
> Jännitelähteen jännite U säädetään useille eri arvoille välillä 0 V – 5 V diodin ollessa sekä päästö- että estosuunnassa. Jännitemittarin lukeman ja jännitelähteen jännitteen avulla lasketaan edellä olevilla kaavoilla diodin läpi kulkeva sähkövirta ja sen jännitehäviö jokaiselle jännitelähteen jännitteen arvolle. Estosuunnassa jännitehäviö merkitään negatiivisena. Näin saadut ominaiskäyrän mittauspisteet (U_d, I) esitetään taulukkona tai kuvaajana.
>
> (6 p.)
>
> Ennakoitu tulos: Ominaiskäyrässä sähkövirta on lähes nolla, kun jännite on negatiivinen (estosuunta) tai kun jännite on positiivinen (päästösuunta) mutta alle diodin kynnysjännitteen. Kynnysjännitteen jälkeen sähkövirta kasvaa hyvin voimakkaasti jännitteen kasvaessa.
>
> (2 p.)

10. Saippuakuplat **20 p.**

Fyysikko rentoutuu puhaltelemalla saippuakuplia puutarhakeinussaan.

10.1 Auringonvalo heijastuu kuplien pinnoista. Selitä, miksi heijastuneessa valossa näkyy eri värejä. **5 p.**

Kun auringonvalo osuu ulkopintaan, osa siitä heijastuu ja osa taittuu kalvon sisään. Kalvossa valo etenee, kunnes se saavuttaa sisäpinnan, josta osa valosta heijastuu takaisin. Ulkopinnasta heijastuneessa valossa on puolen aallonpituuden vaihesiirtymä. Ulko- ja sisäpinnasta heijastuneet valonsäteet interferoivat. Valonsäteiden interferenssi on vahvistava, mikäli ehto

$$2d = (m + 1/2)\lambda/n$$

toteutuu. Yhtälössä $2d$ on interferoivien säteiden välinen matkaero, kokonaisluku $m = 0, 1, 2, \ldots$, λ valon aallonpituus ja n kalvon taitekerroin. Valo, jonka aallonpituus toteuttaa tämän ehdon, heijastuu vahvistavasti kuplasta, kun taas valo, jonka aallonpituus totetuttaa ehdon $2d = m\lambda/n, m = 1, 2, \ldots$, heijastuu vaimentavasti eikä näytä heijastuvan pinnasta.

Koska aallon kalvossa kulkema matka riippuu kulmasta, jossa se osuu saippuakuplaan, eri väriset aallot heijastuvat joko toisiaan vahvistaen tai vaimentaen eri kohdista kuplaa. Tämän takia leijuvan saippuakuplan pinnassa näkyy erivärisiä vyöhykkeitä.

10.2 Selitä, miksi kuplan värit vähitellen haalistuvat ja juuri ennen kuplan puhkeamista häviävät miltei kokonaan. **3 p.**

Tarkastellaan vahvistavan interferenssin ehtoa valonsäteille, jotka ovat heijastuneet kalvon sisä- ja ulkopinnasta: $2d = (m + 1/2)\lambda/n$. Vahvistava interferenssi voi tapahtua vain kalvolla, jonka paksuus on vähintään $d = \lambda/4 (m = 0)$. Näkyvän valon spektrissä violetilla valolla on lyhin aallonpituus (~ 380 nm) ja punaisella pisin (~ 740 nm). Kun haihtuminen ohentaa kalvoa, vahvistava interferenssi ei ole enää mahdollinen. Violetti väri haalistuu viimeisenä kalvon paksuuden alittaessa $\lambda/4 = 95$ nm.

10.3 Saippuakupla puhkeaa yleensä muutamassa minutissa. Miksi se puhkeaa? Samasta määrästä nestettä voidaan puhaltaa erikokoisia kuplia. Miksi isot kuplat puhkeavat nopeammin kuin pienet kuplat? **4 p.**

Saippuakuplan pinnasta haihtuu vettä, mikä ohentaa kalvoa. Jossain vaiheessa kalvo ohenee niin paljon, että saippuaveden pintajännitys aiheuttaa repeämän ja kupla puhkeaa. Iso kupla on ohuempi kuin pieni. Siksi iso kupla saavuttaa kriittisen kalvon paksuuden nopeammin kuin pieni kupla ja puhkeaa pientä kuplaa nopeammin. Painon aiheuttama nesteen valuminen ohentaa kuplan yläosaa, muttei kokonaan selitä puhkeamista.

10.4 Fyysikko huomaa, että yksi kuplista leijuu paikallaan tyynessä ilmassa. Saippuaveden tiheydeksi oletetaan $1{,}0 \cdot 10^3$ kg/m^3 ja kuplan sisällä olevan ilman lämpötilaksi 26 °C. Ulkoilman lämpötila on 21 °C ja ja kuplan säde 5,0 cm. Määritä näillä tiedoilla kuplan kalvon paksuus. Ilman oletetaan olevan 79 % typpeä ja 21 % happea myös kuplan sisällä. **8 p.**

Olkoon kalvon paksuus d, $d \ll r$, jossa r on kuplan säde. Kalvon massa on $m_{\text{kalvo}} = \rho V = 4\pi\rho r^2 d$, jossa ρ on saippuaveden tiheys.

Näissä lämpötiloissa ja paineissa ilma käyttäytyy ideaalikaasun lailla: $pV = nRT$, jossa $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ on kuplan tilavuus. Syrjäytetyn ilman ainemäärä on

$$n_{\text{syrj}} = \frac{pV}{RT_{\text{ulko}}}.$$

Kuplan sisällä olevan kaasun ainemäärä on

$$n_{\text{kupla}} = \frac{pV}{RT_{\text{kupla}}}.$$

Arkhimedeen lain mukaan syrjäytetyn ilman paino on sama kuin kuplan kokonaispaino. Saadaan siis ehto

$$(0{,}21 M_{O_2} + 0{,}79 M_{N_2}) n_{\text{syrj}} g = m_{\text{kalvo}} g + (0{,}21 M_{O_2} + 0{,}79 M_{N_2}) n_{\text{kupla}} g.$$

(5 p.)

Ratkaistaan yhtälö d:n suhteen: $d = \frac{pV}{4\pi r^2 \rho R}(0{,}21 M_{O_2} + 0{,}79 M_{N_2}) \left(\frac{1}{T_{\text{ulko}}} - \frac{1}{T_{\text{kupla}}}\right)$, joka sievenee muotoon

$$d = \frac{pr}{3\rho R}(0{,}21 M_{O_2} + 0{,}79 M_{N_2}) \left(\frac{1}{T_{\text{ulko}}} - \frac{1}{T_{\text{kupla}}}\right).$$

Sijoitetaan lukuarvot $M_{O_2} = 32{,}0$ g/mol, $M_{N_2} = 28{,}0$ g/mol, $T_{\text{ulko}} = 294{,}15$ K, $T_{\text{kupla}} = 299{,}15$ K, $p = 10^5$ Pa, $R = 8{,}3145 J/mol \cdot K, \rho = 10^6 g/m^3$ ja saadaan vastaukseksi

$$d = 0{,}328488 \cdot 10^{-6} \text{ m} \approx 330 \text{ nm}$$

> (3 p.)

11. Juoman jäähdyttäminen **20 p.**

Artikkelissa 11.A esitellään kolme käytännön koetta ja yksi ajatuskoe erilaisten juomien jäähdyttämisestä.

11.1 Ensimmäisessä kokeessa kolme juomaa laitetaan jääkaappiin. Miksi juomat jäähtyvät eri tahtiin? **4 p.**

> Juomat ovat erilaisissa astioissa. Metallinen tölkki johtaa paremmin lämpöä kuin lasipullo, joten tölkissä olevasta juomasta siirtyy jääkaappiin nopeammin energiaa kuin lasipullossa olevasta. Muovinen kolapullo johtaa lämpöä lasipulloakin huonommin. Kolapullon sisältämä vesimäärä on myös suurempi kuin muiden astioiden, ja sen pinta-ala suhteessa tilavuuteen on pienempi. Siksi se jäähtyy hitaammin.

11.2 Toisessa kokeessa juomat kääritään märkään paperiin. Miksi paperikääre tehostaa jäähtymistä parvekkeella enemmän kuin jääkaapissa? **4 p.**

> Juomat jäähtyvät, koska märästä kääreestä haihtuu vettä. Veden höyrystymislämpö on huomattavan suuri. Höyrystymiseen tarvittava energia tulee suureksi osaksi juomasta. Höyrystymistä tapahtuu enemmän lämpimällä parvekkeella kuin jääkaapissa, koska lämpimän ilman suhteellinen kosteus on pienempi kuin kylmän ja myös koska siellä ilmavirtaukset tehostavat höyrystymistä.

11.3 Kolmannessa kokeessa juomat viilennetään jääkylvyssä. Miksi jääkylpy viilentää juomia nopeasti, ja miksi suolan lisääminen vaikuttaa viilenemisnopeuteen? **4 p.**

> Vesi johtaa lämpöä paremmin kuin ilma. Jääkylvyssä juomat viilenevät tehokkaasti, sillä ne ovat jatkuvasti kosketuksissa veteen, jonka lämpötila on 0 °C, kun kylvyssä on sekä vettä että jäätä. Erityisen nopeasti juomat viilenevät, kun veteen lisätään suolaa, koska suola laskee jään sulamispistettä. Sulamispisteen alenemisen vuoksi jäätä sulaa, jään sulaessa sitoutuu energiaa ja jääkylvyn lämpötila laskee. Siten lämpötilaero juoman ja ympäröivän veden välillä kasvaa ja energiaa siirtyy juomasta veteen nopeammin.

11.4 Viimeisenä esitetään ajatuskoe, jossa litra olutta ($T = 25\ ^\circ\mathrm{C}$) jäähdytetään putkessa. Oleta, että putken säde on 6 cm. Kuinka korkea putken pitäisi olla, jotta juoma voitaisiin jäähdyttää lämpötilaan 9 °C? Voit olettaa, että juoma vastaa ominaisuuksiltaan vettä ja vain pieni osa vedestä höyrystyy. **8 p.**

> Oletetaan, että jäähdytettävä juoma vastaa ominaisuuksiltaan puhdasta vettä. Veden höyrystymislämpö on $r = 2\,260\ \mathrm{kJ/kg}$ ja ominaislämpökapasiteetti $c = 4{,}19\ \mathrm{kJ/kg\ K}$. Moolimassa on $M = 18{,}015 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{kg/mol}$. Tarjoilulämpötila $T = 282{,}15\ \mathrm{K}$ ja lämpötilan muutos $\Delta T = 16\ \mathrm{K}$. Kylläisen vesihöyryn paine riippuu lämpötilasta, ja tarjoilulämpötilassa se on 1,1477 kPa. Paine on niin pieni, että voidaan olettaa vesihöyryn käyttäytyvän ideaalikaasun tavoin.
>
> Höyrystyessään vesi luovuttaa saman verran energiaa höyrylle kuin se menettää jäähtyessään:
>
> $$Q = cm\Delta T = rm_2.$$
>
> Höyrystynyt vesimassa on niin pieni, ettei nesteen massan muutosta tarvitse huomioida. Yllä $m = 1\ \mathrm{kg}$ on nestemäisen veden massa ja m_2 höyrystyneen veden massa. Ideaalikaasun tilanyhtälöstä saadaan
>
> $$m_2 = \frac{pVM}{RT},$$
>
> jossa tilavuus $V = Ah$.
>
> Ratkaistaan yhtälö:
>
> $$h = \frac{cm(\Delta T)RT}{ArpM} = 298\ \mathrm{m} \approx 300\ \mathrm{m}.$$