



## FYSIIKAN KOE 26.3.2020

## HYVÄN VASTAUKSEN PIIRTEITÄ

Fysiikan näkövammaisten korvaavan kokeen hyvän vastauksen piirteet löytyvät erillisenä tiedostona Hyvän vastauksen piirteet -osiosta lautakunnan verkkosivuilta.

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 hyväksytyjä 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.

Fysiikka pyrkii ymmärtämään luonnon perusrakennetta, luonnonilmiöiden perusmekanismeja ja niiden säännönmukaisuuksia. Fysiikassa käsitteellinen tieto ja tietorakenteet pyritään ilmaisemaan mahdollisimman kattavina ja yleisinä. Kokeellinen menetelmä on fysiikan tiedon perusta, ja saavutettu tieto esitetään usein matemaattisina teoriarakenteina ja malleina. Malleilla on keskeinen asema myös kehitettäessä, sovellettaessa ja käytettäessä näin saavutettua tietoa. Fysiikan tiedonhankinnalle, tiedon esittämiselle ja sen soveltamiselle on tyypillistä teorian ja kokeellisuuden nivoutuminen toisiinsa.

Fysiikan kokeessa arvioinnin kohteita ovat sekä fysikaalisen tiedon ymmärtäminen että tiedon soveltamisen taito lukion opetussuunnitelman perusteiden mukaisesti. 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. Luonnontieteiden ja teknologian alaan liittyviä ongelmia ratkaistaan käyttäen ja soveltaen fysiikan käsitteitä ja käsiterakenteita.

Luovuutta ja kekseliäisyyttä osoittavat ratkaisut katsotaan erityisen ansiokkaiksi. Arviointiin vaikuttavat myös kokelaan vastausten selkeys, asiasisällön johdonmukaisuus ja jäsenyisyys.

Fysiikan tehtävän vastaus sisältää vastauksen perustelut, ellei tehtävänannossa ole toisin mainittu. Kokelas osaa yhdistellä tietoa ja soveltaa oppimaansa. Vastaus osoittaa, 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 tehtävässä. Usein vastauksessa tarvitaan tilannekuvioita, voimakuvioita, kytkentäkaavioita tai graafista esitystä. Kuviot, kaaviot ja graafiset esitykset ovat selkeitä ja oppiaineen yleisten periaatteiden mukaisia. Voimakuviossa todelliset voimat erotetaan vektorikomponenteista selkeästi.

Matemaattista käsittelyä edellyttävissä tehtävissä suureyhtälöt ja kaavat on perusteltu tavalla, joka osoittaa kokelaan hahmottaneen tilanteen, esimerkiksi lähtien jostain fysiikan peruslaista tai -periaatteesta. Vastauksessa on esitetty tarvittavat laskut sekä muut riittävät perustelut ja lopputulos. Suureiden arvojen sijoituksia yhtälöön ei digitaalisessa kokeessa tarvitse kirjoittaa näkyviin, jos vastauksessa on selkeästi esitetty, mitä lukuarvoa ja yksikköä kullekin suuresymbolille käytetään. Fysiikan kokeessa kaikki funktio-, graafiset ja symboliset laskimet ovat sallittuja. Symbolisen laskimen avulla tehdyt ratkaisut hyväksytään, kunhan ratkaisusta käy ilmi, mihin tilanteeseen ja yhtälöihin ratkaisu symboleineen perustuu ja lopputuloksen yhteydessä on esitetty tehtävänannossa kysytyn suureen ratkaistu suureyhtälö. Laskimen avulla voidaan ratkaista yhtälöitä ja tehdä päätelmiä kuvaajista tehtävänannon edellyttämällä tavalla.

## OSA I

### 1. Monivalintatehtäviä fysiikan eri osa-alueilta (20 p.)

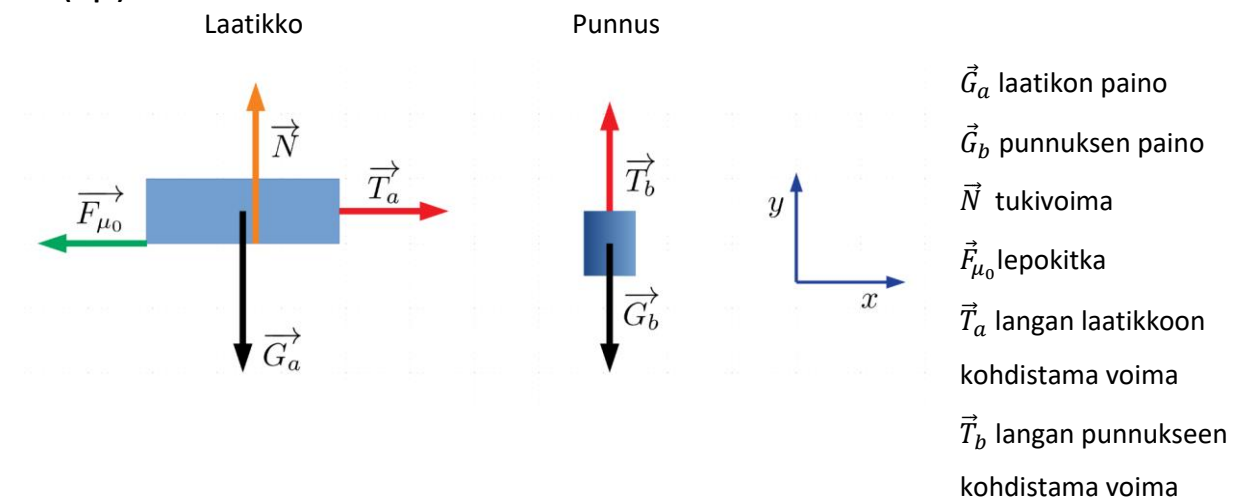
Oikea vastaus 2 p., väärä vastaus 0 p., ei vastausta 0 p.

- 1.1. tasaisesti kiihtyvä liike
- 1.2. seisova aaltoliike
- 1.3. tasainen liike
- 1.4. tasaisesti kiihtyvä liike
- 1.5. vaimeneva värähdysliike
- 1.6. aktiivisuus
- 1.7. voima
- 1.8. resistanssi
- 1.9. ominaislämpökapasiteetti
- 1.10. varaus

## OSA II

### 2. Laatikko ja punnus (15 p.)

#### 2.1. (6 p.)



(6 p.)

## 2.2. (9 p.)

Lepokitka saa suurimman arvonsa  $|F_{\mu_0}| = \mu_0 N$  silloin, kun laatikko on juuri lähtemäisillään liikkeelle.

Kappaleiden tasapainoehdot:

$$\text{Laatikolle} \quad \sum \vec{F}_a = m_a \vec{a}_a = \vec{0},$$

$$\text{x-suunta:} \quad \sum F_{a,x} = F_{\mu_0} + T_a = 0,$$

$$\text{y-suunta:} \quad \sum F_{a,y} = G_a + N = 0.$$

Punnukseen kohdistuu voimia vain y-suunnassa:

$$\text{y-suunta:} \quad \sum F_{b,y} = G_b + T_b = 0.$$

Koska lanka on kevyt, on  $T_a = T_b$ , joten

$$|F_{\mu_0}| = T_a = T_b = |G_b| = m_b g.$$

Lepokitkakerroin on

$$\mu_0 = \frac{|F_{\mu_0}|}{N} = \frac{m_b g}{m_a g} = \frac{m_b}{m_a}$$

(5 p.)

Etsitään simulaation avulla suurinta lepokitkaa vastaava rajatilanne varioimalla punnuksen massaa.

Annetaan valitut massan arvot.

Esimerkiksi arvoilla  $m_a = 1,000 \text{ kg}$  ja  $m_b = 0,340 \text{ kg}$  laatikko pysyy paikallaan, mutta kun  $m_b = 0,341 \text{ kg}$ , laatikko lähtee liikkeelle.

Lepokitkakerroin on

$$\mu_0 = \frac{m_b}{m_a} = \frac{0,340 \text{ kg}}{1,000 \text{ kg}} = 0,34$$

(4 p.)

### 3. Merenpinnan nousu (15 p.)

Valtamerien pinta-alasta ja syvyydestä saadaan meriveden tilavuus  $V = Ad$ . Tilavuuden ja keskimääräisen tiheyden avulla puolestaan määritetään meriveden massa  $m = \rho V$  ja lämpökapasiteetti  $C = cm$ .

Kun merien vuodessa keräämä lämpömäärä on  $Q$ , on lämpötilanmuutos  $\Delta T = \frac{Q}{cm} = \frac{Q}{c\rho Ad}$ .

Sijoitetaan tähän  $Q = 1,3 \cdot 10^{22} \text{ J}$ ,  $c = 3,96 \cdot 10^3 \text{ J/(kg K)}$ ,  $\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$ ,  $A = 3,6 \cdot 10^8 \text{ km}^2 = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$  ja  $d = 3700 \text{ m}$ , jolloin saadaan lämpötilan muutokseksi

$$\begin{aligned}\Delta T &= \frac{1,3 \cdot 10^{22} \text{ J}}{3,96 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{(\text{kg K})} \cdot 1030 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3,6 \cdot 10^{14} \text{ m}^2 \cdot 3700 \text{ m}} \\ &= 2,3928013 \cdot 10^{-3} \text{ K} \approx 0,0024 \text{ K}.\end{aligned}$$

(6 p.)

Tämä aiheuttaa lämpölaajenemisen  $\Delta V = \gamma V \Delta T$ , jossa  $\gamma$  on tilavuuden lämpötilakerroin vedelle.

Tilavuuden muutos ei muuta oleellisesti merien pinta-alaa, mutta kylläkin niiden syvyyttä. Merenpinnan nousu on  $\Delta h = \frac{\Delta V}{A}$ , josta saamme

$$\Delta h = \frac{\gamma V \Delta T}{A} = \frac{\gamma V Q}{A c \rho V} = \frac{\gamma Q}{A c \rho}.$$

(6 p.)

Sijoitetaan lausekkeeseen seuraavat suureiden arvot:  $\gamma = 1,37 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$ ,  $Q = 1,3 \cdot 10^{22} \text{ J}$ ,  $A = 3,6 \cdot 10^8 \text{ km}^2 = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$ ,  $c = 3,85 \cdot 10^3 \text{ J/(kg K)}$  ja  $\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$ .

Merenpinnan nousu on  $\Delta h = 1,247566 \text{ mm} \approx 1,2 \text{ mm}$ . (3 p.)

On huomion arvoista, että lopputulos ei riipu merien syvyydestä – merien ei tarvitse siis lämmetä läpikotaisin, vaan riittää jos lämpenemistä tapahtuu esimerkiksi vain ensimmäisellä 500 metrillä.

#### 4. Pimeässä huoneessa (15 p.)

4.1. Ilmiössä on kyse valon taipumisesta eli diffraktiosta. Varjostimelle syntyy valoisia pisteitä sellaisiin kohtiin, jossa eri raoista tulleen säteet interferoivat vahvistavasti. (3 p.)

4.2. Punaiset täplät siirtyvät kauemmas toisistaan. (2 p.)

4.3. Punaiset täplät pysyvät paikoillaan. (2 p.)

4.4. Varjostimella nähdään samankaltainen kuvio kuin kohdassa 4.1. (2 p.)

4.5. Punaiset täplät siirtyvät kauemmas toisistaan. (3 p.)

4.6. Täplät siirtyvät lähemmäs toisiaan. (3 p.)

#### 5. Kiertokäämimittari (15 p.)

##### 5.1. (8 p.)

$I = 100 \text{ mA}$  suurin mitattava sähkövirta

$I_c = 0,10 \text{ mA}$  suurin sähkövirta käämissä

$R_c = 360 \Omega$  käämin resistanssi

$I_R$  sähkövirta vastuksessa  $R_I$

Kirchhoffin virtalaki:  $I = I_c + I_R$ ,

$$I_R = I - I_c.$$

Käämin napajännite saadaan Ohmin laista:

$$U_c = R_c I_c.$$

Koska vastus  $R_I$  ja käämi on kytketty rinnan, vastuksen napajännite on yhtä suuri kuin käämin napajännite.

(4 p.)

Vastuksen resistanssi on siis

$$R_I = \frac{U_c}{I_R} = \frac{R_c I_c}{I - I_c} = \frac{360 \Omega \cdot 0,10 \text{ mA}}{(100 - 0,10) \text{ mA}} = 0,36036036 \dots \Omega \approx 0,36 \Omega$$

(4 p.)

**5.2. (7 p.)**

$$U = 1,0 \text{ V}$$

suurin mitattava jännite

$$U_R$$

vastuksen  $R_U$  napajänniteKirchhoffin jännitelaki:  $U = U_c + U_R$ ,

$$U_R = U - U_c.$$

Kun mittari näyttää maksimiarvoa, sähkövirta käämin läpi on yhtä suuri kuin kohdassa 5.1., joten käämin napajännite on

$$U_c = R_c I_c.$$

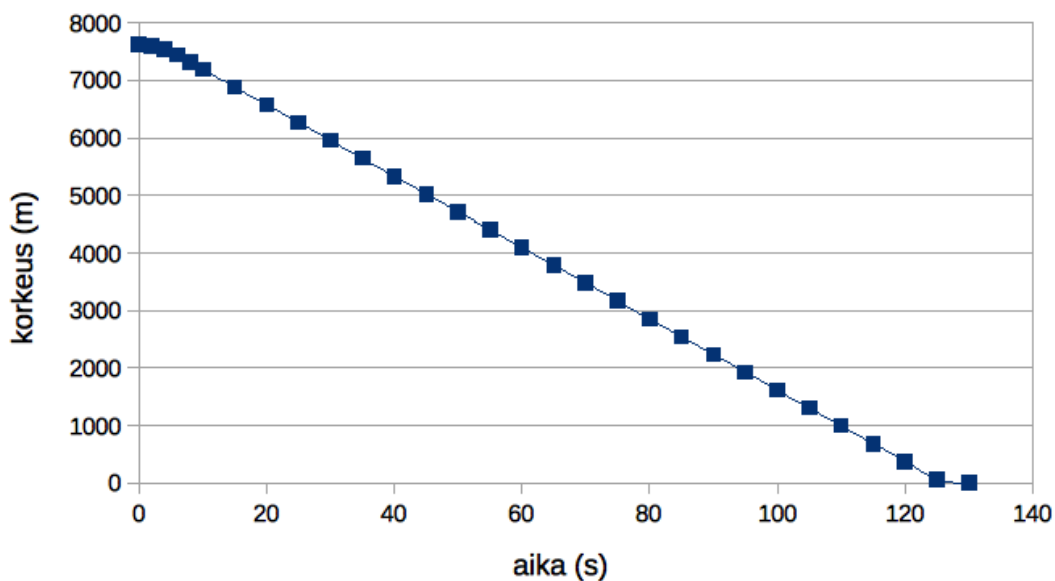
Koska käämi ja vastus  $R_U$  on kytketty sarjaan, sähkövirta vastuksen läpi on yhtä suuri kuin suurin sähkövirta käämin läpi.

(4 p.)

Vastuksen resistanssi saadaan Ohmin lain avulla.

$$R_U = \frac{U_R}{I_c} = \frac{U - U_c}{I_c} = \frac{U - R_c I_c}{I_c} = \frac{1,0 \text{ V}}{0,10 \text{ mA}} - 360 \Omega = 9640 \Omega \approx 9,6 \text{ k}\Omega.$$

(3 p.)

**6. Hyppy ilman laskuvarjoa (15 p.)****6.1. (8 p.)**

(Kuva 4 p.)

Kuvaajasta nähdään, että Aikinsin nopeus on lähes koko hypyn ajan vakio.

Newtonin II lain mukaan  $mg - F_i = 0$  eli  $F_i = 95 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 930 \text{ N}$ .

(4 p.)

## 6.2. (7 p.)

Väite "vapaassa pudotuksessa syntyy paljon liike-energiaa" on virheellinen.

Hyppääjällä on alussa potentiaalienergiaa Maan gravitaatiokentässä.

Putoamisen aikana tämä potentiaalienergia muuntuu liike-energiaksi.

Hyppääjän saavutettua putoamisen rajanopeuden hänen liike-energiansa ei enää kasva, vaan potentiaalienergia muuntuu hyppääjän ja ympäröivän ilman vuorovaikutuksen (ilmanvastuksen) seurauksena ilman sisäenergiaksi (ilmamolekyylien liike-energiaksi).

(3 p.)

Väite "jos osuu maahan, kineettinen energia heijastuu maasta takaisin kehoon ja murskaa sen" on virheellinen. Kineettinen energia ei heijastu maasta.

Jos hyppääjä ei osuisi verkkoon vaan maahan, maanpinta kohdistaisi häneen erittäin suuren liikettä hidastavan voiman. Hidastavan voiman vaikutus kehoon ylittäisi kehon kestokyvyn ja kehon rakenteet rikkoutuisivat.

Riippumatta siitä, osuuko hyppääjä turvaverkkoon vai maahan, hänen nopeutensa pienenee putoamisen rajanopeudesta nollaan. Tämän saa aikaan joko maanpinnasta tai turvaverkosta hyppääjään kohdistuva tukivoima. Kummassakin tapauksessa hyppääjän liikemäärä muuttuu yhtä paljon, joten myös tukivoimien impulssit ovat yhtä suuret. Impulssi on  $I = \int F dt$ . Jos hyppääjä törmää maanpintaan, tukivoiman vaikutusaika on hyvin lyhyt, joten vastaavasti tukivoima on hyvin suuri, eikä keho kestä sitä. Turvaverkko pidentää törmäyksen kestoaikaa huomattavasti, jolloin tukivoima on paljon pienempi, eikä se ylitä kehon kestokykyä.

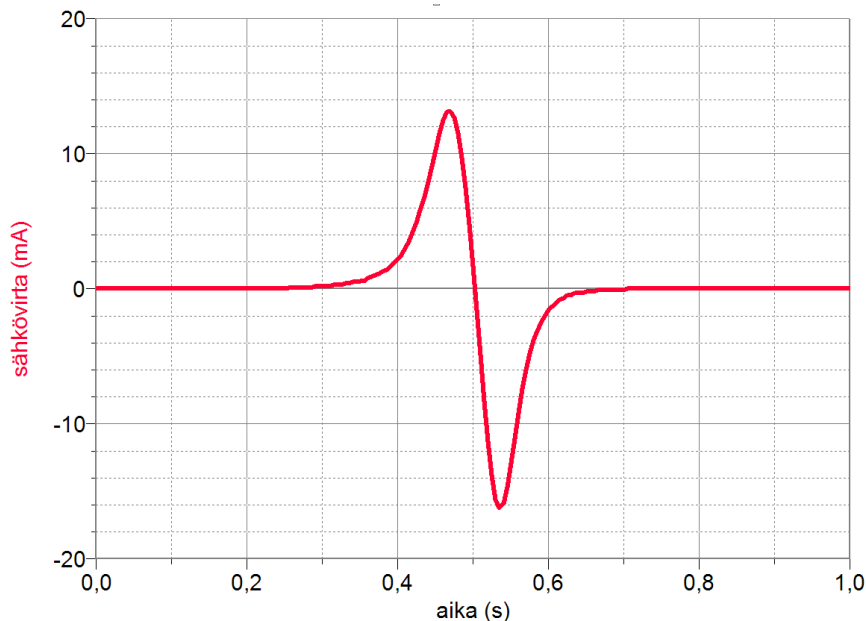
Tilannetta voidaan tarkastella myös energian ja työn avulla. Rajanopeudella putoavalla hyppääjällä on liike-energiaa. Kun nopeus pienenee nollaan, liike-energia pienenee nollaan maanpinnan tai turvaverkon hyppääjään kohdistaman tukivoiman tekemän negatiivisen työn vaikutuksesta. Se on yhtä suuri riippumatta siitä, osuuko hyppääjä maanpintaan vain turvaverkkoon. Työ on  $W = \int F ds$ , jossa  $s$  on voiman vaikutusmatka. Jos hyppääjä törmää maanpintaan, tukivoiman vaikutusmatka on hyvin lyhyt, joten vastaavasti tukivoima on hyvin suuri, eikä keho kestä sitä. Turvaverkko pidentää tukivoiman vaikutusmatkaa huomattavasti, jolloin tukivoima on paljon pienempi, eikä se ylitä kehon kestokykyä.

(4 p.)



## 7. Putoava sauvamagneetti (15 p.)

### 7.1. (7 p.)



(Kuva 4 p.)

Sauvamagneetin tullessa käämin sisään magneettivuoto käämin sisällä kasvaa. Muuttuva magneettivuoto aiheuttaa käämiin lähdejännitteen induktiolain  $e = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  mukaisesti. Käämi on kytketty virtaanturiin, joten se on suljettu. Olkoon käämin resistanssi  $R$ . Induktiojännite  $e$  synnyttää Ohmin lain mukaan virran  $I = e/R$ .

(3 p.)

### 7.2. (8 p.)

Sähkövaraus  $\Delta Q$  ja sähkövirta  $I$  liittyvät toisiinsa lain  $I = \Delta Q / \Delta t$  kautta.

Tästä seuraa, että  $\Delta Q = I \Delta t$ , eli sähkövaraus saadaan määrittämällä sähkövirran kuvaajan  $I(t)$  ja aika-akselin väliin jäävän alueen fysikaalinen pinta-ala.

Jaetaan aikaintegraali kahteen osaan: Integroidaan ensin virta etumerkin vaihtumiseen saakka ja saadaan varauksen muutos  $\Delta Q_1$ . Tämän jälkeen integroidaan virta etumerkin vaihtumisen jälkeen ja saadaan varauksen muutos  $\Delta Q_2$ . Varausten muutosten arvot ovat

$$\Delta Q_1 = 0,8665 \text{ mC}$$

$$\Delta Q_2 = -0,8655 \text{ mC}$$

Todetaan, että  $|\Delta Q_1| \approx |\Delta Q_2|$ .

(8 p.)

TAI

Olkoon käämin resistanssi  $R$ . Induktiojännite  $e$  synnyttää Ohmin lain mukaan virran  $I = e/R$ . Kun tähän lausekkeeseen sijoitetaan induktiojännite  $e = -N\Delta\Phi/\Delta t$ , saadaan

$$I = -\frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Kokonaisvaraus, joka kulkee ajanjakson  $\Delta t$  aikana käämin läpi, on  $\Delta Q = I\Delta t$ .

Yhdistetään edelliset lausekkeet, jolloin saadaan käämin läpi kulkeva sähkövaraus:

$$\Delta Q = -\frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \cdot \Delta t = -\frac{\Delta\Phi}{R}.$$

Ensimmäisen virtapiikin aikana vuo kasvaa nolasta maksimiarvoon. Toisen vastakkaismerkkisen virtapiikin aikana vuo pienenee maksimiarvosta nolnaan, jolloin vuon muutokset ovat itseisarvoiltaan yhtä suuret. Näin ollen myös käämin läpi kulkeneet sähkövaraukset ovat yhtä suuret. (8 p.)

TAI

Käämissä kulkee induktiojännitteen aikaansaama suljetun virtapiirin virta.

Ohmin lain mukaan virta on suoraan verrannollinen induktiojännitteeseen  $e$ . Näin ollen myös sähkövirta on verrannollinen vuon muutosnopeuteen:  $I \sim d\Phi/dt$ . Toisaalta koska sähkövirran kuljettama varaus on  $dq = Idt$ , saadaan että  $dQ \sim d\Phi$ .

Ensimmäisen virtapiikin aikana vuo kasvaa nolasta maksimiarvoon. Toisen vastakkaismerkkisen virtapiikin aikana vuo pienenee maksimiarvosta nolnaan, jolloin vuon muutokset ovat itseisarvoiltaan yhtä suuret. Näin ollen myös käämin läpi kulkeneet sähkövaraukset ovat yhtä suuret. (8 p.)

## 8. Röntgensäteily (15 p.)

### 8.1. (8 p.)

Röntgenputkessa elektroneja kiihdytetään korkeajännitteellä tyhjiössä, ja nopeasti liikkuvat elektronit törmäävät anodiin. (3 p.)

Spektrin jatkuva osa aiheutuu elektronien hidastumisesta (jarrutussäteily). (2 p.)

Kuvassa näkyvät piikit aiheutuvat Mo-anodin atomien virittymisestä ja viritystilan purkautumisesta.

Piikkien energiat ovat käytetylle anodimateriaalille ominaisia. (3 p.)

## 8.2. (7 p.)

Röntgendiffraktiossa röntgensäteily siroaa tutkittavan aineen atomeista (tarkemmin atomien elektroneista). Aineen atomit toimivat kolmiulotteisen hilan tapaan. Niissä pisteissä, joissa sironneiden aaltojen maksimit osuvat kohdakkain (interferoivat konstruktiiivisesti), havaitaan intensiteettimaksimeita. (3 p.)

Diffraktiokuvion perusteella voidaan laskea esimerkiksi aineen hilatasojen etäisyyksiä soveltamalla Braggin lakia  $n\lambda = 2d \sin \theta$ .

Röntgendiffraktiolla voidaan siis tutkia ainetta, jolla on säännöllinen rakenne (kiteistä ainetta). (4 p.)

## OSA III

### 9. Ionin ominaisvarauksen määrittäminen (20 p.)

Laite, jolla voidaan määrittää ionien ominaisvaraus, on nimeltään massaspektrometri.

Massaspektrometrejä on useita erilaisia.

Ionin ominaisvaraus voidaan määrittää muun muassa seuraavan tyyppisillä massaspektrometreillä:

- kvadrupoli-analysaattori
- Ionien syklotroni-resonanssiin perustuva analysaattori
- ionien lentoaika-analysaattori
- magneettiset sektorianalysaattorit
- sähköstaattiset analysaattorit.

Vastauksessa riittää, että kokelas kuvaa yhden tarkoitukseen sopivan laitteiston. Tehtävän esimerkkipisteitys:

- toimiva idea (3 p.)
- kokeessa käytettyjen välineiden mainitseminen (3 p.)
- koelaitteiston toiminnan tarkempi kuvaus (5 p.)
- ominaisvarauksen määrittämiseen käytettävän yhtälön johtaminen (5 p.)
- mittausmenetelmään oleellisesti liittyvien tuloksen tarkkuuteen ja luotettavuuteen vaikuttavien tekijöiden kuvailu (vähintään kolme oleellisesti erilaista vaikuttavaa tekijää) (4 p.)

Lukion oppimateriaaleissa on usein kuvattu massaspektrometri, jossa on yhdistetty sähköstaattinen ja magneettinen analysaattori. Tällaisessa massaspektrometrissä on kolme osaa: kiihdyttävä sähkökenttä, sähköstaattinen ionien nopeusvalitsin ja analysointimagneettikenttä. Myös sellaiset laitteistot, joissa kiihdyttävän sähkökentän jälkeen on vain nopeusvalitsin ja detektori tai analysointimagneettikenttä ja detektori, soveltuvat ionin ominaisvarauksen määrittämiseen.

Aluksi ionit tulevat homogeeniseen sähkökenttään, jossa ionit kiihdytetään sopivaan nopeuteen. Nopeutta säädetään sähkökentän kiihdytysjännitteellä  $U$ :

$$\frac{1}{2}mv^2 = qU,$$

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}.$$

Voidaan havaita, että ionit, joilla on eri ominaisvaraus  $q/m$ , saavat sähkökentässä eri nopeuden.

Ionien nopeus saadaan määritettyä nopeusvalitsimessa, jossa on toisiaan vastaan kohtisuorasti homogeeninen sähkökenttä ja magneettikenttä. Kun ioni lentää kohtisuorasti sekä sähkökenttää että magneettikenttää vastaan, vain tietyllä nopeudella lentävät ionit saapuvat suoraan analysointimagneettikentän sisäänmenoon. Tällaisiin suoraan kulkeviin ioneihin vaikuttava sähköinen voima ja magneettinen voima ovat tasapainossa, eli

$$qE = qvB,$$

$$v = \frac{E}{B}.$$

Tarvitaan siis tietoa sekä sähkökentän voimakkuudesta  $E$  että magneettikentän magneettivuon tiheyden voimakkuudesta  $B$ . Vaikka ionien nopeudet olisivat yhtä suuret, niiden massojen ja varauksien ei tarvitse olla yhtä suuria.

Tämän jälkeen nopeusvalitsimen läpi päässeiden ionien lentorata kulkee kohtisuorasti homogeeniseen analysointimagneettikenttään. Magneettinen voima kaareuttaa ionien lentoradan ympyräradaksi. Radan säde saadaan määritettyä Newtonin II lain avulla:

$$qvB' = \frac{mv^2}{r},$$

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{rB'} = \frac{E}{rBB'}$$

Massaspektrometrillä mitataan, mihin kohtaan ilmaisinta ioni osuu, ja siitä saadaan määritettyä lentoradan säde  $r$ . Myös nopeusvalitsimen sähkökentän voimakkuus  $E$  ja magneettikentän magneettivuon tiheys  $B$  sekä analysointimagneettikentän magneettivuon tiheys  $B'$  täytyy tuntea. Tällöin voidaan ratkaista ionien ominaisvaraus  $q/m$ .

Tuloksen luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi mittauslaitteiston osien tarkoituksenmukaisuus ja toimivuus sekä mittaajan taidot laitteiden käytössä.

Tuloksen tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa:

- Massaspektrometrin ilmaisimen erotuskyky, joka vaikuttaa siihen, että eri säteillä lentävät ionit voidaan erotella toisistaan.
- Analysointimagneettikentän sisäänmenoaukon koko. Mitä pienempi aukko, sitä tarkemmin valituilla ioneilla on sama nopeus ja lentosuunta. Nopeuksien eroavaisuus vaikuttaa lentoradan säteeseen, ja siten tiettyä ominaisvarausta vastaavan intensiteettiinkin leveyteen ilmaisimella.
- Sähkö- ja magneettikenttien homogeenisuus.
- Sähkökenttien ja magneettivuon tiheyden voimakkuuden mittaamisen käytettävien mittareiden tarkkuus.
- Mittausdatan keräysaika. Mitä pidempään mitataan, sitä paremmin tiettyä ominaisvarausta vastaava intensiteetti erottuu taustakohinasta, kun ioneja ehtii saapua enemmän ilmaisimelle.

## 10. Painovoima-aallot ja LIGO (20 p.)

### 10.1. (5 p.)

LIGO mittaa suoraan painovoima-aaltojen aiheuttamaa ilmiötä (suhteellinen venymä järjestelmässä kulkevien valonsäteiden kulkemassa matkassa).

Vuoden 1974 havainnossa nähtiin pulsarien menettävän energiaa, mutta havainto ei sulje pois sitä mahdollisuutta, että tämä energia poistuu jollakin muulla tavalla kuin painovoima-aaltoina. (5 p.)

### 10.2. (8 p.)

Energiaa poistui 0,15 millisekunnin aikana  $3M_{\odot}c^2 = 6 \cdot 10^{30} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ kg m}^2/\text{s}^2$ , (4 p.)

joten gravitaatioaaltojen teho on  $P = \frac{3M_{\odot}c^2}{0,015 \text{ s}} = 200M_{\odot}c^2/\text{s} = 3,6 \cdot 10^{49} \text{ W}$ . Tämä vastaa noin  $10^{23}$

Auringon tehoa. (4 p.)

### 10.3. (7 p.)

Kuvasta 10.B (alaneeli) nähdään, että signaalin alkaessa hetkellä 0,35 s, jolloin kappaleet kiertävät toisiaan (signaalin oskillaatio vakiotajuudella), kappaleiden välinen etäisyys on noin neljä kertaa Schwarzschildin säde. Kappaleelle, jonka massa on noin 62 Auringon massaa, Schwarzschildin säde on noin 180 km. Kappaleiden välinen etäisyys on siis vain noin 700 km. Tämä sulkee pois tavalliset tähdet ja valkoiset kääpiöt, sillä niiden säteet ovat niin paljon tätä etäisyyttä suurempia. Kappaleet voisivat olla neutronitähtiä, mutta näiden massat eivät voi olla 30 kertaa Auringon massan suuruisia, kuten LIGO havaitsi. Kappaleiden on siis oltava mustia aukkoja. (7 p.)

## 11. Hörypuhdistin (20 p.)

### 11.1. (8 p.)

Tasapainotilassa hörypuhdistimen säiliössä on nestemäistä vettä ja vesihöyryä. Systemin tila on siis veden faasidiagrammissa kaasun ja nesteen rajakäyrällä. (4 p.)

Laitteen arvokilven mukaan käyttöpaine on 3,5 bar. Veden lämpötila on faasidiagrammin mukaan tällöin noin 140 °C. (4 p.)

### 11.2. (8 p.)

Arvokilven mukaan lämmitysvastuksen teho on  $P = 1800 \text{ W}$ . (2 p.)

Koska paineastia on täynnä vettä, kylmäisen höyryn paine saavutetaan hyvin pienellä määrällä höyrystynyttä vettä. Tämä voidaan jättää huomiotta energiaa tarkasteltaessa.

Veden lämmittämiseen tarvitaan energiaa  $\Delta E = Q = cm\Delta T = P\Delta t$ , josta saadaan lämmitysajaksi

$$\Delta t = \frac{cm\Delta T}{P} = 311,9222 \text{ s} \approx 310 \text{ s} \approx 5,2 \text{ min}, \quad (6 \text{ p.})$$

kun  $m = 1,0 \text{ kg}$ ,  $c = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$  ja  $\Delta T = (140 - 6) \text{ °C} = 134 \text{ °C} = 134 \text{ K}$ .

(Valmistajan ilmoituksen mukaan käyttövalmiiksi lämmittämiseen kuluu 6–6,5 min.)

### 11.3. (4 p.)

Sähkövastus on puhtaasti resistiivinen, joten sen lämmitysteho on tehollisen jännitteen ja virran tulo. Tehollinen jännite on  $U = 230 \text{ V}$ , joten vastaava tehollinen virta on

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1800 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 7,826 \text{ A} \approx 7,8 \text{ A}. \quad (4 \text{ p.})$$