FYSIIKKA, NÄKÖVAMMAISTEN KORVAAVA KOE 26.3.2020
HYVÄN VASTAUKSEN PIIRTEITÄ

Koe pidettiin poikkeuksellisesti 19.3.2020

Lopulliset hyvän vastauksen piirteet 12.5.2020

Lopullisista hyvän vastauksen piirteistä ilmenevät perusteet, joiden mukaan koesuorituksen lopullinen arvostelu on suoritettu. Tieto siitä, miten arvosteluperusteita on sovellettu kokelaan koesuoritukseen, muodostuu kokelaan koesuorituksestaan saamista pisteistä, lopullisista hyvän vastauksen piirteistä ja lautakunnan määräyksissä ja ohjeissa annetuista arvostelua koskevista määräyksistä. Lopulliset hyvän vastauksen piirteet eivät välttämättä sisällä ja kuvaa tehtävien kaikkia hyväksyttyjä vastausvaihtoehtoja tai hyväksytyn vastauksen kaikkia hyväksyttyjä yksityiskohtia. Koesuorituksessa mahdollisesti olevat arvostelumerkinnät katsotaan muistiinpanoluonteisiksi, eivätkä ne tai niiden puuttuminen näin ollen suoraan kerro arvosteluperusteiden soveltamisesta koesuoritukseen.

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 jäsentyneisyys.

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.)

Laatikkoon kohdistuu langan radan suunnassa kaksi voimaa, köyden jännitys *T* väkipyörän suuntaan ja lepokitka F_{μ} vastakkaiseen suuntaan. Pysytysuorassa suunnassa laatikkoon vaikuttavat paino alaspäin ja radan tukivoima ylöspäin. Punnukseen vaikuttaa köyden jännitys ylöspäin ja paino alaspäin. (6 p.)

Langan ollessa kireällä langan jännitys *T* on yhtä suuri kuin punnukseen kohdistuva köyden jännitys. Langan massaa ei huomioida, sillä lanka on kevyt. Kun punnus ei liiku, köyden jännitys on $T = Mg$, jossa *M* on punnuksen massa. Laatikkoon kohdistuvan lepokitkan suurin arvo on $F_{\mu} = \mu N$, jossa μ on laatikon ja radan välinen lepokitkakerroin ja *N* on laatikkoon kohdistuva paino. Paino on $N = mg$. (4 p.)

Lepokitka voidaan määrittää seuraavasti: Lisätään punnuksen massaa vähän kerrallaan, kunnes laatikko lähtee liikkeelle. Liikkeelle lähtö tapahtuu, kun langan jännitys on yhtä suuri kuin lepokitkan suurin arvo eli kun $T = F_\mu$ eli $Mg = \mu mg$.
Määrittämällä tätä rajatilannetta vastaava punnuksen massa *M*, lepokitkakerroin saadaan määritettyä yhtälöstä $\mu = \frac{M}{m}$. (5 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 $Q = 1{,}3 \cdot 10^{22}\ \mathrm{J}$, $c = 3{,}96 \cdot 10^3\ \mathrm{J/(kg\ K)}$, $\rho = 1030\,\mathrm{kg/m^3}$, $A = 3{,}6 \cdot 10^8\ \mathrm{km}^2 = 3{,}6 \cdot 10^{14}\ \mathrm{m}^2$ ja $d = 3700\ \mathrm{m}$, jolloin saadaan lämpötilan muutokseksi

$$\Delta T = \frac{1{,}3 \cdot 10^{22}\ \mathrm{J}}{4{,}000 \cdot 10^3\,\frac{\mathrm{J}}{(\mathrm{kg\ K})\rho} \cdot 1030\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} \cdot 3{,}6 \cdot 10^{14}\ \mathrm{m}^2 \cdot 3700\ \mathrm{m}}$$

$$= 2{,}36887 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{K} \approx 0{,}0024\ \mathrm{K}.$$

Tämä aiheuttaa lämpölaajenemisen $\Delta V = \gamma V \Delta T$, jossa γ 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

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

Sijoitetaan lausekkeeseen seuraavat suureiden arvot: $\gamma = 1{,}37 \cdot 10^{-4}\ 1/\mathrm{K}$, $Q = 1{,}3 \cdot 10^{22}\mathrm{J}$, $A = 3{,}6 \cdot 10^8\ \mathrm{km}^2 = 3{,}6 \cdot 10^{14}\ \mathrm{m}^2$, $c = 3{,}96 \cdot 10^3\ \mathrm{J/(kg\ K)}$ ja $\rho = 1030\,\mathrm{kg/m^3}$.

Merenpinnan nousu on $\Delta h = 1{,}212911205\ \mathrm{mm} \approx 1{,}2\ \mathrm{mm}$.

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.

Pisteitys:

Lähtöyhtälönä on esitetty lämpömäärän lauseke (2 p.), ja siitä johdettu lämpötilan muutoksen suurelauseke (2 p.). Lämpötilan muutoksen arvo on määritetty (2 p.).

Tilavuuden lämpölaajenemisen yhtälö on esitetty (2 p.). On johdettu merenpinnan nousukorkeus tilavuuden muutoksen avulla käyttäen tietoa, että merien pinta-ala pysyy vakiona (2 p.). Merenpinnan nousukorkeudelle on johdettu suurelauseke (2 p.) ja määritetty sen avulla nousukorkeus (3 p.).

Tyypillisiä virheitä:
Yksikönmuunnoksessa on tehty kertaluokkavirhe, jolloin sekä lämpötilan muutokselle että nousukorkeudelle on saatu epäfysikaalisen suuret arvot (pistemenetys 5 p.).
Tilavuuden lämpölaajenemisen sijasta on tarkasteltu pituuden lämpölaajenemista (pistemenetys 5 p.). Mikäli lopputulokset on annettu suuremmalla kuin 100 µK:n tai 100 µm:n tarkkuudella, kyseisen lopputuloksen pisteitä ei ole annettu.

4. Pimeässä huoneessa (15 p.)

4.1. Maksimit siirtyvät kauemmas toisistaan. (3 pistettä)

4.2. Maksimit pysyvät paikoillaan. (3 pistettä)

4.3. Ilmaisimella havaitaan samankaltainen intensiteettijakauma kuin kohdassa 4.1. (3 pistettä)

4.4. Maksimit siirtyvät kauemmas toisistaan. (3 pistettä)

4.5. Maksimit siirtyvät lähemmäs toisiaan. (3 pistettä)

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.

Vastuksen resistanssi on siis

$$R_\mathrm{I} = \frac{U_\mathrm{c}}{I_R} = \frac{R_\mathrm{c} I_\mathrm{c}}{I - I_\mathrm{c}} = \frac{360\ \Omega \cdot 0{,}10\ \mathrm{mA}}{(100 - 0{,}10)\ \mathrm{mA}} = 0{,}36036036 \dots\ \Omega\ \approx 0{,}36\ \Omega.$$

Pisteitys:

On käytetty Kirchhoffin virtalain mukaista sähkövirran jakautumisen periaatetta (2 p.). On todettu, että käämissä ja vastuksessa on sama jännite (2 p.). Vastuksen resistanssille on johdettu suureyhtälö (2 p.), ja on annettu resistanssin suuruus (2 p.).

5.2. (7 p.)

$U = 1{,}0\ \text{V}$	suurin mitattava jännite
U_R	vastuksen R_U napajännite
Kirchhoffin 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.

Vastuksen resistanssi saadaan Ohmin lain avulla.

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

Pisteitys:

On todettu, että Kirchhoffin jännitelain mukaan jännitemittauksessa vastuksen ja käämin jännitteet summautuvat. (Tai on todettu, että resistanssit summautuvat, koska vastus ja kela on kytketty sarjaan.) (2 p.) On sovellettu Ohmin lakia kelan jännitteen (tai virtapiirin kokonaisresistanssin määrittämiseen sähkövirran avulla.) (1 p.) On johdettu suureyhtälö vastuksen resistanssille (2 p.), ja laskettu resistanssin arvo (2 p.).

6. Hyppy ilman laskuvarjoa (15 p.)

6.1. (6 p.)

Hyppääjän putoama matka *s* = 7620 m.
Matkaan kulunut aika *t* = 127 s.
Hyppääjän massa varusteineen *m* = 95 kg.
Koska hyppääjän oletetaan saavuttaneen rajanopeuden heti hypyn alussa, saadaan keskimääräiseksi putoamisnopeudeksi

$$v = \frac{s}{t} = \frac{7620\ \mathrm{m}}{127\ \mathrm{s}} \approx 60\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$$

Kun hyppääjä on saavuttanut rajanopeuden, on sen nopeus vakio ja kiihtyvyys nolla. Newtonin II lain *F* = *ma* mukaan hyppääjään kohdistuva kokonaisvoima on nolla. Hyppääjään vaikuttavat voimat ovat vastakkaisiin suuntiin vaikuttavat ilmanvastus, jotka ovat yhtä suuret. Ilmanvastus on

$$F_i = G = mg \approx 930\ \mathrm{N}.$$

Pisteitys:

Keskimääräinen nopeus on määritetty (2 p.). On todettu, että hyppääjän nopeus on hypyn keskivaiheilla (likimain) vakio (2 p.). On esitetty Newtonin II lakiin perustuva ilmanvastuksen suureyhtälö (1 p.) ja laskettu siitä ilmanvastuksen suuruus (1 p.).

6.2. (9 p.)

a. 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).

b. 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.

c. Väite "verkon kudelma venyi sopivasti ja imi syöksyjän liike-energian" on virheellinen. Liike-energia ei "imeydy" verkkoon ja se muuttuu verkon ja sylintereiden liike- ja sisäenergiaksi.

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.

Pisteitys:

Kunkin virheellisen kohdan osoittaminen. (1 p.)

Kohta a: Tunnistetaan, että energia muuntuu muodosta toiseen (1 p), ja kuvataan potentiaalienergian muuttuminen liike-energiaksi ja ilmanvastusvoimien tekemäksi työksi (1 p.).

Kohta b: Kuvataan Newtonin 3. lain mukainen voima-vastavoimapari maahan osuessa (2 p.)

Kohta c: Kuvataan liike-energian muuntuminen verkkoon osuessa TAI kuvataan impulssin avulla törmäysajan vaikutus voimiin (2 p.)

Tyypillinen virhe: Kohdassa a: Potentiaalienergia muuntuu kokonaan liike-energiaksi mekaanisen energian säilymislain nojalla.

7. Putoava sauvamagneetti (15 p.)

7.1. (7 p.)

Sauvamagneetin tullessa käämin sisään magneettivuo käämin sisällä kasvaa. Muuttuva magneettivuo aiheuttaa käämiin induktiolain mukaisesti lähdejännitteen $e = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, joka ilmenee virtapiikkinä käämiin yhdistetyssä virta-anturissa. Ensimmäinen piikki syntyy magneetin siirtyessä käämin sisälle, jolloin magneettivuo kasvaa. Toinen piikki syntyy, kun magneetti siirtyy ulos käämin sisältä, jolloin magneettivuo pienenee.

Pisteitys:
Sähkövirran syntyminen osana suljettua virtapiiriä olevaan käämiin (2 p.) on selitetty muuttuvan magneettivuon (tai induktiolain) (3 p.) ja lähdejännitteen indusoitumisen avulla (2 p.).

7.2. (8 p.)

Käämissä kulkee induktiojännitteen aikaansaama suljetun virtapiirin sähkövirta. Ohmin lain mukaan sähkövirta on suoraan verrannollinen induktiojännitteeseen. Näin ollen myös sähkövirta on verrannollinen vuon muutosnopeuteen: $I \propto \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$. Toisaalta koska virran kuljettama varaus on $\mathrm{d}q = I\,\mathrm{d}t$, saadaan että $\mathrm{d}q \propto \mathrm{d}\Phi$.

Ensimmäisen virtapiikin aikana vuo kasvaa nollasta maksimiarvoon. Toisen vastakkaismerkkisen virtapiikin aikana vuo pienenee maksimiarvosta nollaan, jolloin vuon muutokset ovat itseisarvoiltaan yhtä suuret. Näin ollen myös käämin läpi kulkeneet sähkövaraukset ovat yhtä suuret.

Pisteitys:
On selitetty käämin sähkövirta magneettivuon muutoksen avulla (2 p.) ja esitetty varaus sähkövirran avulla (2 p.). Päätelty näistä, että käämissä kulkeva sähkövaraus on verrannollinen magneettivuon muutokseen (2 p.). Todetaan, että vuon muutos on molempien piikkien aikana itseisarvoltaan yhtä suuri, joten myös sähkövaraukset ovat yhtä suuret (2 p.).

8. Röntgensäteily (15 p.)

8.1. (8 p.)

Röntgensäteilyn jatkuva osa syntyy, kun putkessa kiihdytetty elektroni hidastuu anodissa törmäillessään anodiaineen atomeihin. Hidastuessaan se lähettää sähkömagneettista säteilyä, jota kutsutaan jarrutussäteilyksi.

Kun elektronin energia on tarpeeksi suuri, elektroni voi irrottaa elektroneja kohtaamansa anodiaineen atomin sisimmiltä energiakuorilta. Syntyneeseen tyhjään paikkaan siirtyy välittömästi toinen elektroni joltakin ylemmältä energiakuorelta. Samalla atomi säteilee sähkömagneettista säteilyä, jonka energia on sama kuin energiakuorten välinen energiaero. Tätä säteilyä kutsutaan kyseisen anodiaineen ominaissäteilyksi. Koska näitä siirtymiä tapahtuu suuressa määräsää atomeja, havaitaan röntgenputken lähettämässä säteilyssä intensiteettipiikit ko. energioita vastaavien aallonpituuksien kohdalla.

Pisteitys:
Vastauksessa on kerrottu, että röntgenputkessa kiihdytetään elektroneja jännitteen tai sähkökentän avulla (2 p.), elektronit törmäävät anodiin (1 p.) ja elektronit hidastuvat synnyttäen

jarrutussäteilyä (spektrin kumpumainen osan) (2 p.). On selitetty piikkien syntyvän, kun sisäkuorien elektronien virittymiset purkautuvat ja todettu, että piikit ovat kullekin anodiaineelle ominaiset (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 konstruktiivisesti), havaitaan intensiteettimaksimeita.

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).

Pisteitys:

On mainittu, että röntgensäteily siroaa tutkittavan aineen atomeista ja että eri atomeista sironneet aallot interferoivat keskenään (3 p.). Braggin laki on mainittu tai esitetty yhtälönä, ja yhteys aineen rakenneosasten (atomitasojen) etäisyyteen on mainittu (3 p.). On todettu, että menetelmä sopii kiteisten (säännöllisen rakenteen omaavien) aineiden tutkimiseen (1 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.

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 intensiteettipiikin 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 intensiteettipiikki erottuu taustakohinasta, kun ioneja ehtii saapua enemmän ilmaisimelle.

Pisteitys:
Vastauksessa kuvataan tarkoitukseen sopiva laitteisto. Kuvauksessa on esitetty toimiva idea (3 p.), lueteltu kokeessa käytettävät laitteet (3 p.), kuvattu laitteiston toiminta ja kerrottu mitä suureita tulee kokeessa mitata (5 p.), johdettu ominaisvarauksen määritykseen käytettävä suureyhtälö (5 p.) ja kuvailtu mittausmenetelmän tarkkuuteen ja luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä (4 p.).

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.

Pisteitys:
Suoran mittauksen selittäminen (3 p.), epäsuoran mittauksen selittäminen (2 p.).

10.2. (8 p.)

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

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

Pisteitys:

Poistunut energia on laskettu Einsteinin kaavan avulla (2 p.). On esitetty tehon suureyhtälö ja laskettu sen avulla gravitaatioaaltojen teho (3 p.). On verrattu tehoa Auringon tehoon esittämällä asianomai-nen suureyhtälö (tehojen osamäärä) ja laskemalla sen arvo (3 p.).

Tyypillisiä virheitä: Energian laskemisessa ei ole huomioitu valonnopeutta tai valonnopeus on ensim-mäisessä potenssissa. Tehon arvoa ei ole esitetty pyöristetyssä muodossa.

10.3. (7 p.)

Toisiaan kiertävien kappaleiden välinen etäisyys oli noin 700 km. Tämä sulkee pois tavalliset tähdet ja valkoiset kääpiöt, sillä näiden säteet ovat suurempia kuin 700 km. Etäisyys olisi mahdollinen, jos kappaleet olisivat neutronitähtiä, mutta näiden massat eivät voi olla 30 kertaa Auringon massa, kuten LIGO havaitsi. Kappaleiden on siis oltava mustia aukkoja.

Pisteitys:

Törmäävien kappaleiden etäisyys toisistaan mittauksen alussa on mainittu (3 p.) Tähdet on suljettu pois kiertoetäisyyden perusteella (eivät voi suurien säteidensä takia kiertää toisiaan mittaustulosten mukaiselle etäisyydellä toisistaan) (2 p.). Neutronitähdet on suljettu pois liian pienen massansa takia tai sen takia, että törmäyksen alkaessa ne olisivat vielä liian kaukana toisistaan (2 p.).

11. Höyrypuhdistin (20 p.)

11.1. (8 p.)

Painelämpötilalain mukaan vesihöyryn paineen ja lämpötilan suhde on vakio, kun tilavuus ei muutu. Tämän takia vesihöyryn lämpötila riippuu paineesta.

Säiliössä on sekä nestemäistä vettä että vesihöyryä, mikä on mahdollista, kun säiliön paine ja lämpötila vastaavat pistettä kaasun ja nesteen rajakäyrällä veden faasidiagrammissa.

Pisteitys:

On todettu painelämpötilalain perusteella, että lämpötilan riippuu paineesta (4 p.).

Todetaan, että säiliössä on vettä sekä nesteenä että kaasuna (2 p.) ja on selitetty, että lämpötila ja paine vastaavat faasidiagrammin nesteen ja kaasun rajakäyrällä olevaa pistettä (2 p.).

11.2. (8 p.)

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

$\Delta t = \frac{cm\,\Delta T}{P} = 311{,}9222\ \mathrm{s} \approx 310\ \mathrm{s} \approx 5{,}2\ \mathrm{min}$,
kun $P = 1800\ \mathrm{W}$, $m = 1{,}0\ \mathrm{kg}$, $c = 4{,}19\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\ K}}$ ja $\Delta T = (140 - 6)\ °\mathrm{C} = 134\ °\mathrm{C} = 134\ \mathrm{K}$.

Pisteitys:

Teholle on esitetty suurelauseke (2 p.), josta on johdettu lämmitysajan suureyhtälö (3 p.) ja laskettu lämmitysaika (3 p.) (arvot välillä 5,2 min – 5,4 min on hyväksytty).

11.3. (4 p.)

Sähkövastus on puhtaasti resistiivinen, joten sen lämmitysteho on tehollisen jännitteen ja virran tulo. Tehollinen jännite on U = 230 V, joten vastaava tehollinen virta on
$I = \frac{P}{U} = \frac{1800\ \mathrm{W}}{230\ \mathrm{V}} = 7{,}826\ \mathrm{A} \approx 7{,}8\ \mathrm{A}$.

Pisteitys:

On todettu, että tehollinen jännite on 230 V (2 p.). On laskettu sähkövirta Ohmin lain avulla (arvot välillä 7,5 A – 8,2 A hyväksytään) (2 p.).

Tyypillinen virhe: On sekoitettu käsitteet jännitteen (sähkövirran) tehollinen arvo ja huippuarvo.