DRŽAVNO NATJECANJE IZ FIZIKE

Poreč, 10.–13. travnja 2019.

Srednje škole - 4. skupina

1. Higgsov bozon h je neutralna čestica mase $m_h c^2 = 125\,\mathrm{GeV}$ koja se u akceleratorima čestica može stvoriti na razne načine, između ostalog i u sudaru dva kvarka. U ovom ćemo zadatku promotriti produkciju Higgsovog bozona uslijed sudara b kvarka sa svojom antičesticom, $\bar{b}$ anti-kvarkom,

$$b\bar{b} \to h.$$

Postoji nekoliko načina kako sudariti kvarkove:

- kvarkove možemo ubrzati do iste brzine v_1 te ih zatim čeono sudariti ili
- možemo jedan kvark (npr. b) ubrzati do brzine v_2 te ga sudariti s drugim mirujućim kvarkom ($\bar{b}$).

Odredite kolike moraju biti brzine v_1 i v_2 da bi došlo do produkcije Higgsovog bozona prilikom sudara u oba slučaja. Izračunajte koliko uložene energije zahtijeva svaki od mehanizama pod pretpostavkom da prije sudara oba kvarka miruju. Prilikom izračuna zanemarite (elektromagnetske itd.) interakcije među kvarkovima prije sudara. Masa b kvarka iznosi $m_b c^2 = 4.5\,\mathrm{GeV}$.

[18 BODOVA]

2. Kvantni sustavi koji se nalaze u pobuđenom stanju nisu stabilni već imaju karakteristično vrijeme života τ. Poznate Heisenbergove relacije tada uvjetuju neodređenost u energiji ΔE pripadnog stanja tako da vrijedi

$$\tau \Delta E = \frac{h}{4\pi}.$$

Drugim riječima, ne možemo točno odrediti energiju pobuđenog stanja, jedino što znamo da ona poprima vrijednosti iz intervala $E \in [\bar{E} - \Delta E/2, \bar{E} + \Delta E/2]$, oko neke srednje vrijednosti $\bar{E}$. Srednju vrijednost energije računamo tako da zanemarujemo nestabilnost pobuđenih stanja. Na primjer, srednje energije stanja vodikovog atoma su dane dobro poznatom jednadžbom

$$\bar{E}_n = -\frac{13.6\,\mathrm{eV}}{n^2},$$

s tim da energija osnovnog stanja nema neodređenost $E_1 = \bar{E}_1 = -13.6\,\mathrm{eV}$. Preciznim mjerenjima spektralnih linija moguće je odrediti neodređenosti u energiji pobuđenih stanja, pa i izračunati njihovo vrijeme života.

U jednom se eksperimentu mjerio spektar plinovitog vodika čiji su atomi bili u pobuđenim stanjima s kvantnim brojevima $n = 2$ i $n = 3$. Dobivene su tri široke spektralne linije sa sljedećim vrijednostima valnih duljina

$$\lambda_1 \in [102.65\,\mathrm{nm}, 102.82\,\mathrm{nm}], \quad \lambda_2 \in [121.75\,\mathrm{nm}, 121.77\,\mathrm{nm}], \quad \lambda_3 \in [653.72\,\mathrm{nm}, 661.38\,\mathrm{nm}].$$

Odredite kojim prijelazima odgovaraju ove linije te izračunajte neodređenosti u energijama za pobuđena stanja, ΔE_2 i ΔE_3, kao i njihova vremena života τ_2 i τ_3.

[16 BODOVA]

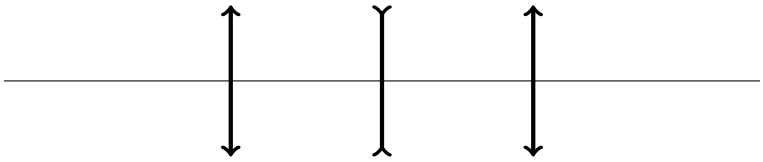
3. Spremnik stalnog volumena sadrži atomski plin vodika gustoće $\rho = 0.1\,\mathrm{g/cm^3}$. Postupnim zagrijavanjem dolazi do ionizacije te se plin pretvara u plazmu, koja se ponaša kao dvokomponentni idealni plin. Pretpostavite da do ionizacije dolazi na točno određenoj temperaturi T_i i ugrubo odredite tu temperaturu. Vodite se idejom da je tipična termalna energija $E_\mathrm{term} \approx kT$ (predfaktori tipa 3/2 nisu bitni za grubu ocjenu temperature) te da ona uzrokuje ionizaciju. Također, zanemarite utjecaj defekta mase. Dolazi li do promjene tlaka Δp uslijed ionizacije? Ako da, izračunajte tu promjenu. Daljnjim zagrijavanjem plazme, na stijenke spremnika, osim same plazme, sve više djeluje i tlak termičkog zračenja. Veza između tlaka zračenja i temperature T dana je formulom

$$p_\mathrm{rad} = \frac{4\sigma}{3c} T^4,$$

gdje su σ i c fundamentalne konstante. U trenutku kad se tlakovi plazme i zračenja izjednače dolazi do pucanja spremnika. Odredite na kojoj temperaturi spremnik puca te koji je tlak u tom trenu djelovao na njegove stijenke.

[18 BODOVA]

4. Optički sustav od tri tanke leće konstruiran je kao na slici. Dvije su leće konvergentne, dok je jedna divergentna, a sve imaju istu žarišnu duljinu $f = 10\,\mathrm{cm}$. Konvergentne leće su udaljene za $\ell = 10\,\mathrm{cm}$, a divergentna leća se nalazi točno na polovici između njih.



- Ako snop svjetlosti upada s lijeva na prvu leću paralelno optičkoj osi, nađite udaljenost d od treće leće do točke na optičkoj osi gdje snop konvergira.
- Ako se točkasti predmet stavi na optičku os na udaljenosti x ispred prve leće, a njegova slika nastaje na istoj udaljenosti iza treće leće, odredite x.

[18 BODOVA]

Vrijednosti fizikalnih konstanti:

- brzina svjetlosti: $c = 3.00 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$;
- masa elektrona: $m_\mathrm{e} = 9.11 \times 10^{-31}\,\mathrm{kg}$;
- masa protona: $m_\mathrm{p} = 1.67 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}$;
- Planckova konstanta: $h = 6.63 \times 10^{-34}\,\mathrm{J\,s} = 4.14 \times 10^{-15}\,\mathrm{eV\,s}$;
- Boltzmannova konstanta: $k = 1.38 \times 10^{-23}\,\mathrm{J/K} = 8.62 \times 10^{-5}\,\mathrm{eV/K}$;
- Stefan-Boltzmannova konstanta: $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\,\mathrm{Wm^{-2}K^{-4}}$.

DRŽAVNO NATJECANJE IZ FIZIKE

Poreč, 10.–13. travnja 2019.

Srednje škole - 4. skupina, rješenja i smjernice za bodovanje

Upute za bodovanje: Ovdje je prikazan jedan način rješavanja zadataka. Ukoliko učenici riješe zadatak drugačijim, a fizikalno ispravnim načinom, treba im dati puni broj bodova predviđen za taj zadatak. Ako učenici ne napišu posebno svaki ovdje predviđeni korak, a vidljivo je da su ga napravili, treba im dati bodove kao da su ga napisali.

1. • Ako se dva kvarka čeono sudaraju istom brzinom tada će, zbog zakona očuvanja količine gibanja, nužno stvoriti Higgsov bozon u mirovanju. [1 BOD]

  Prema tome, energija svakog kvarka prije sudara mora biti

$$E = \gamma_1 m_b c^2 = \frac{1}{2} m_h c^2. \qquad [2 \text{ BODA}]$$

  Iz toga slijedi

$$v_1 = c\sqrt{1 - \left(\frac{2m_b}{m_h}\right)^2} \qquad [2 \text{ BODA}]$$
$$= 2.9922 \times 10^8 \,\mathrm{m/s}. \qquad [1 \text{ BOD}]$$

  Pritom je potrebno uložiti energiju jednaku zbroju kinetičke energije oba kvarka

$$T_1 = m_h c^2 - 2m_b c^2 \qquad [2 \text{ BODA}]$$
$$= 116\,\mathrm{GeV}. \qquad [1 \text{ BOD}]$$

• Ako pak sudaramo jedan kvark u drugi, mirujući, kvark, tada će se stvoreni Higgsov bozon gibati. Najlakši način da odredimo parametre ovog sudara jest da napravimo Lorentzovu transformaciju prethodnog slučaja. [1 BOD]

  U sustavu koji se giba brzinom v_1 anti-kvark će mirovati, a kvark će imati brzinu

$$v_2 = \frac{2v_1}{1 + \frac{v_1^2}{c^2}} = c\frac{\sqrt{1 - \left(\frac{2m_b}{m_h}\right)^2}}{1 - 2\left(\frac{m_b}{m_h}\right)^2} \qquad [3 \text{ BODA}]$$
$$= 2.9999 \times 10^8 \,\mathrm{m/s}. \qquad [1 \text{ BOD}]$$

  Budući da se Higgsov bozon nakon sudara giba brzinom v_1, uložena energija, tj. kinetička energija kvarka, u ovom slučaju je

$$T_2 = \gamma_1 m_h c^2 - 2m_b c^2 = \frac{(m_h^2 - 4m_b^2)c^2}{2m_b} \qquad [3 \text{ BODA}]$$
$$= 1.7271\,\mathrm{TeV}. \qquad [1 \text{ BOD}]$$

  Očito, čeoni sudar zahtijeva manje uložene energije.

2. Za početak izračunamo valnu duljinu prijelaza $n \to m$ zanemarujući neodređenost u energiji. Iz formule

$$\lambda_{n\to m} = \frac{hc}{\bar{E}_n - \bar{E}_m} \qquad \text{[2 boda]}$$

lako nalazimo

$$\lambda_{2\to 1} = 121.76\,\text{nm}, \quad \lambda_{3\to 1} = 102.74\,\text{nm}, \quad \lambda_{3\to 2} = 657.53\,\text{nm}. \qquad \text{[3 boda]}$$

Prema tome, zaključujemo da spektralna linija λ_1 odgovara prijelazu $3 \to 1$, λ_2 prijelazu $2 \to 1$, a λ_3 prijelazu $3 \to 2$. [1 BOD]

Dalje, širine pobuđenih stanja računamo prema

$$\Delta E_2 = h\Delta\nu_{2\to 1} = hc\left(\frac{1}{\lambda_{2,\text{min}}} - \frac{1}{\lambda_{2,\text{max}}}\right) \qquad \text{[2 boda]}$$

$$= 1.68\,\text{meV}, \qquad \text{[1 bod]}$$

za $n = 2$, odnosno

$$\Delta E_3 = h\Delta\nu_{3\to 1} = hc\left(\frac{1}{\lambda_{1,\text{min}}} - \frac{1}{\lambda_{1,\text{max}}}\right) \qquad \text{[2 boda]}$$

$$= 0.02\,\text{eV}, \qquad \text{[1 bod]}$$

za $n = 3$. Konačno, vremena života su

$$\tau_2 = \frac{h/4\pi}{\Delta E_2} = 1.96 \times 10^{-13}\,\text{s}, \quad \tau_3 = \frac{h/4\pi}{\Delta E_3} = 1.65 \times 10^{-14}\,\text{s}. \qquad \text{[4 boda]}$$

3. Tempreraturu ionizacije možemo procijeniti iz uvjeta da termička energija kT bude jednaka energiji vezanja vodika $E_{\text{vez}} = 13.6\,\text{eV}$,

$$E_{\text{term}} = E_{\text{vez}} \quad \rightsquigarrow \quad T_{\text{i}} = \frac{E_{\text{vez}}}{k} = 1.58 \times 10^5\,\text{K}. \qquad \text{[4 BODA]}$$

Tlak vodika prije ionizacije računamo iz jednadžbe stanja idealnog plina

$$p_{\text{vod}} = \frac{N}{V} k T_{\text{i}}, \qquad \text{[2 BODA]}$$

gdje je N broj atoma vodika u spremniku volumena V, dok, nakon ionizacije, tlak plazme računamo pomoću Daltonovog zakona o parcijalnim tlakovima gdje posebno promatramo pozitivne (protone) i negativne (elektrone) ione kao idealni plin. Budući da iz svakog vodika dobijemo jedan proton i jedan elektron, broj protona je opet N, što je ujedno i broj elektrona. Budući da i protoni i elektroni ispunjavaju spremnik te se nalaze na istoj temperaturi, vrijedi

$$p_{\text{pl}} = \frac{N}{V} k T_{\text{i}} + \frac{N}{V} k T_{\text{i}} = 2 p_{\text{vod}}. \qquad \text{[3 BODA]}$$

Prema tome, promjena u tlaku tijekom ionizacije iznosi

$$\begin{aligned} \Delta p = p_{\text{pl}} - p_{\text{vod}} = p_{\text{vod}} &= \frac{N m_{\text{v}}}{V m_{\text{v}}} k T_{\text{i}} \\ &= \frac{\rho}{m_{\text{v}}} k T_{\text{i}} && \text{[2 BODA]} \\ &= 1.30 \times 10^{11}\,\text{Pa}. && \text{[1 BOD]} \end{aligned}$$

U predzadnjoj smo jednakosti uveli gustoću vodika $\rho = N m_{\text{v}} / V$ i masu atoma vodika $m_{\text{v}} = m_{\text{p}} + m_{\text{e}}$.

Tlak plazme i tlak zračenja će biti jednaki na temperaturi određenoj uvjetom

$$\frac{4\sigma}{3c} T^4 = \frac{2\rho}{m_{\text{v}}} k T \quad \rightsquigarrow \quad T = \left(\frac{3\rho c k}{2\sigma m_{\text{v}}} \right)^{1/3} = 1.87 \times 10^7\,\text{K}. \qquad \text{[3 BODA]}$$

Pri toj temperaturi ukupni je tlak na stijenku spremnika

$$p_{\text{uk}} = p_{\text{pl}} + p_{\text{rad}} = \frac{4\rho}{m_{\text{v}}} k T = 6.18 \times 10^{13}\,\text{Pa}. \qquad \text{[3 BODA]}$$

4. • Koristimo jednadžbu tankih leća za svaku leću posebno. Ako svjetlost upada paralelno na prvu leću, to znači da se izvor nalazi u beskonačnosti, $a_1 = \infty$, pa imamo

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{b_1} = \frac{1}{f} \quad \rightsquigarrow \quad b_1 = f = 10\,\text{cm}. \qquad [3 \text{ BODA}]$$

Slika prve leće je izvor za drugu leću i nalazi se na udaljenosti $a_2 = -(b_1 - \ell/2)$ od nje. Prema tome, jednadžba leće daje

$$\frac{1}{a_2} + \frac{1}{b_2} = -\frac{1}{f} \quad \rightsquigarrow \quad b_2 = -\frac{a_2 f}{a_2 + f} = 10\,\text{cm}, \qquad [3 \text{ BODA}]$$

gdje smo vodili računa da je druga leća divergentna. Konačno, izvor za treću leću je na udaljenosti $a_3 = -(b_2 - \ell/2)$ od nje pa je konačni položaj slike

$$\frac{1}{a_3} + \frac{1}{b_3} = \frac{1}{f} \quad \rightsquigarrow \quad b_3 = \frac{a_3 f}{a_3 - f} = 3.33\,\text{cm}. \qquad [3 \text{ BODA}]$$

• Da bi optički sustav napravio simetričnu sliku, nužno je da i središnja leća napravi simetričnu sliku. Odnosno, mora vrijediti

$$|a_2| = |b_2| = 2f = 10\,\text{cm}. \qquad [3 \text{ BODA}]$$

Sad je lako vidjeti da je, npr.

$$b_1 = |a_2| + \ell/2 = 25\,\text{cm}, \qquad [3 \text{ BODA}]$$

pa jednadžba leće za prvu leću daje, uz $a_1 = x$

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{b_1} = \frac{1}{f} \quad \rightsquigarrow \quad x = \frac{b_1 f}{b_1 - f} = 16.67\,\text{cm}. \qquad [3 \text{ BODA}]$$

DRŽAVNO NATJECANJE IZ FIZIKE
Poreč, 10. – 13. travnja 2019.

Srednje škole – 4. skupina

EKSPERIMENTALNI ZADATAK

Pribor:

- drvena letvica
- prozirna tkanina
- karton
- crni hamer
- bijeli papir
- ravnalo
- krojački metar
- škare
- selotejp
- tanki flomaster

Zadatak:

1. Odredite valnu duljinu svjetlosti tako da:
   a) opišete način pripreme uređaja koji ćete koristiti pri mjerenju i nacrtate skicu s označenim bitnim dijelovima … 3 boda
   b) opišete teorijsku osnovu eksperimentalnog postupka uz odgovarajuću skicu i izvod izraza kojeg ćete koristiti … 3 boda
   c) opišete način na koji ćete odrediti udaljenost dvije niti na tkanini … 2 boda
   d) opišete način kako ste pripremili pukotinu i odredili njezinu širinu … 2 boda
   e) tablično prikažete rezultate za minimalno pet mjerenja za svaku od dvije različite udaljenosti tkanine od pukotine … 6 bodova
   f) prema dobivenim rezultatima za valnu duljinu u tablicama prekrižite mjerenja koja predstavljaju grubu pogrešku … 1 bod
   g) provedete račun slučajnih pogrešaka uz zapis točnog rezultata i određivanje relativne maksimalne pogreške zasebno za svaku udaljenost … 6 bodova
   h) ukratko komentirate preciznost mjerenja prema dobivenim maksimalnim relativnim pogreškama … 1 bod
   i) usporedite dobivene rezultate za valnu duljinu sa vidljivim područjem spektra elektromagnetskog zračenja … 2 boda
   j) navedete na koji ste način postigli što veću preciznost mjerenja … 1 bod
   k) ukratko opišete što je sve tijekom mjerenja moglo uzrokovati grube pogreške … 1 bod
   l) zaključno povežete svoje eksperimentalne rezultate s teorijskim odnosom promatrane pojave u ovisnosti o udaljenosti, kao i o širini pukotine … 2 boda

---

Ukupno: …….**30 bodova**

Natjecateljima želimo uspješan rad!

DRŽAVNA SMOTRA I NATJECANJE MLADIH FIZIČARA
Poreč, 10. – 13. travnja 2019.

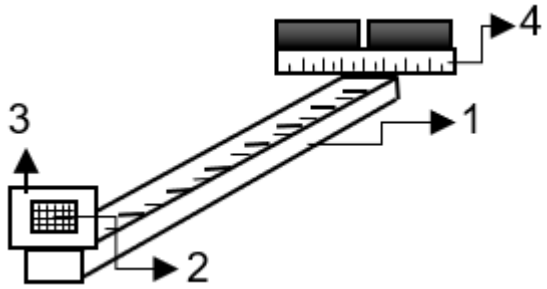
Srednje škole – 4. skupina

EKSPERIMENTALNI ZADATAK – rješenje

1. Odredite valnu duljinu svjetlosti tako da:

a) opišete način pripreme uređaja koji ćete koristiti pri mjerenju i nacrtate skicu s označenim bitnim dijelovima … 3 boda

Valnu duljinu s priborom i materijalima koji su na raspolaganju možemo odrediti na način da letvicu iskoristimo kao držač (1) za tkaninu koja predstavlja optičku rešetku (2) i za koju je potrebno od kartona napraviti otvor na jednom kraju (3). Ravne bridove kartona koristimo za pripremu pukotine (4) – Slika 1.



Slika 1. Skica uređaja s označenim bitnim dijelovima

b) opišete teorijsku osnovu eksperimentalnog postupka uz odgovarajuću skicu i izvod izraza kojeg ćete koristiti … 3 boda

Elektromagnetske valove na koje je osjetljivo ljudsko oko nazivamo vidljivom svjetlošću: valne duljine vidljivog područja svjetlosti protežu se u intervalu od 400 nm do 750nm.

Kada ravni val nailazi na prepreku ili pukotinu, opaža se da mijenja smjer širenja i ulazi u geometrijsku sjenu. Ta pojava skretanja vala naziva se ogib ili difrakcija i karakteristična je za valno širenje, pri čemu se prepreka ili pukotina ponašaju kao izvori novih kuglastih valova. Poseban je slučaj ogib svjetlosti kroz optičku rešetku, koju definiramo kao prepreku s N paralelnih uskih pukotina međusobnog razmaka d kojeg nazivamo konstanta optičke rešetke.

Približna vrijednost valne duljine svjetlosti može se dobiti jednostavnim pokusom tako da tkanina s pravilno raspoređenim nitima djeluje kao optička rešetka s konstantom d. Opažač kroz tkaninu promatra interferentnu sliku s obje strane pukotine, pri čemu se valna duljina može izračunati iz izraza prema slici 2:

$$\sin \alpha_1 = \frac{\lambda}{d} \qquad (1)$$

Ako udaljenost između središnjeg i prvog svijetlog maksimuma označimo slovom 's' i udaljenost između optičke rešetke i pukotine slovom 'a', uz uvjet da je je $s \ll A$, možemo napisati izraz prema slici 3:

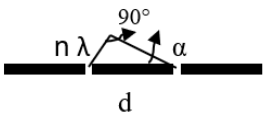
$$\sin \alpha_1 = \frac{s}{A} = \frac{s}{a} \qquad (2)$$

Uvrstimo li relaciju (2) u lijevu stranu jednadžbe (1) i zatim iz toga izrazimo valnu duljinu λ, dobit ćemo konačan izraz prema kojem možemo odrediti valnu duljinu prema mjerenjima za prvi maksimum:

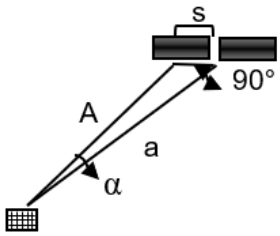
$$\lambda = \frac{s \cdot d}{a} \qquad (3)$$

Općenito za n maksimuma relaciju (3) možemo izraziti kao:

$$n\lambda = \frac{s_n \cdot d}{a} \qquad (4)$$



Slika 2. Skica uz izraz (1)



Slika 3. Skica uz izraz (2)

c) opišete način na koji ćete odrediti udaljenost dvije niti na tkanini … 2 boda

Koristeći tanki flomaster (ili kemijsku olovku), označite na prozirnoj tkanini minimalno 10 (preciznije 20) razmaka između pojedinih niti i zatim izmjerite udaljenost d'. Ako dobivenu vrijednost podijelite s brojem razmaka između niti, dobit ćete zadovoljavajuće precizan rezultat d za udaljenost između dvije niti, što predstavlja konstantu za tkaninu koja je u eksperimentalnom setu optička rešetka.

Priznaju se i drugi načini određivanja d, uz kratak i precizan opis rada.

d) opišete način kako ste pripremili pukotinu i odredili njezinu širinu … 2 boda

Povezivanje teorijskih osnova sa promišljanjem o najpraktičnijem eksperimentalnom setu dovest će najvjerojatnije do slijedećeg postupka:

1. odrede se rubovi kartona koji će biti rubovi pukotine i izrežu se na odgovarajuću veličinu radi mogućnosti postavljanja na letvicu;
2. kartoni koji čine pukotinu pomoću selotejpa se učvrste na povezujući element od kartona, koji će se izravno selotejpom učvršćivati na letvicu;
3. na gornji dio s obje strane pukotine učvrsti se crni hamer, prethodno izrezan na odgovarajuću veličinu;
4. na donji dio ispod pukotine zalijepi se bijeli papir na kojem je prethodno flomasterom, kemijskom ili tehničkom olovkom nacrtana mjerna skala kojoj je u sredini pukotine '0' i zatim su lijevo i desno označeni milimetri, veće crtice za 5 mm i još veće i deblje crte za 10 mm, tj. 1 cm: u smjeru -x i x osi u odnosu na '0'.

Priznaju se i drugi domišljati načini rješavanja koji su rezultirali zadovoljavajuće preciznim mjerenjima.

e) tablično prikažete rezultate za minimalno pet mjerenja za svaku od dvije različite udaljenosti tkanine od pukotine … 6 bodova

Prema razrađenim teorijskim osnovama pod b) i slici 2. veličine koje će biti mjerene potrebno je sustavno prikazati u tablici, kako bi bila postignuta zornost i preglednost izmjerenih i izračunatih veličina. Obzirom da se radi o mjerenjima za dvije različite udaljenosti, mogu se prikazati u jednoj zajedničkoj ili u dvije različite tablice.

Radi što preglednije organizacije podataka prikupljenih tijekom mjerenja i rezultata na osnovu eksperimentalnog rada, prijedlog je da se uz tablicu odmah postavi i stupac s izračunatom valnom duljinom, kao i stupac pojedinačnog odstupanja rezultata valne duljine od dobivene srednje vrijednosti za pojedinu udaljenost.

Primjer tabličnog prikaza (oznake trebaju biti usklađene s teorijskim osnovama i slikom 2. pod b):

Tablica 1. Tablični prikaz rezultata određivanja valne duljine svjetlosti

Redni broj mjerenja	d/mm	a/mm	s/mm	λ_i/m	$(\overline{\lambda} - \lambda_i)$/m
1.					
…					
5.					

f) prema dobivenim rezultatima za valnu duljinu u tablicama prekrižite mjerenja koja predstavljaju grubu pogrešku … 1 bod

Grubim pogreškama za ovaj eksperimentalni set smatraju se svi rezultati koji su izvan poznatog intervala valnih duljina vidljivog područja spektra elektromagnetskog zračenja, što je potrebno analizirati pod točkama i) i k).

g) provedete račun slučajnih pogrešaka uz zapis točnog rezultata i određivanje relativne maksimalne pogreške zasebno za svaku udaljenost … 6 bodova

Tijekom mjerenja velika je vjerojatnost slučajnih pogrešaka, koje su najčešće subjektivne naravi.

Računom slučajnih pogrešaka procjenjujemo točnost kojom smo izmjerili određenu veličinu, pri čemu određujemo:

- aritmetičku sredinu ili srednju vrijednost svih pojedinih mjerenja:

$$\overline{\lambda} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{5} \lambda_i \qquad (5)$$

- razlike između srednje vrijednosti i svakog pojedinačnog mjerenja: $\Delta \overline{\lambda}_i = (\lambda - \lambda_i)$ m (6)
- apsolutnu vrijednost maksimalnog pojedinačnog odstupanja: $|\Delta \lambda_{i\,max}|$ m (7)
- zapis točnog rezultata: $\lambda = (\overline{\lambda} \pm |\Delta \lambda_{i\,max}|)$ m (8)
- maksimalnu relativnu pogrešku koju najčešće izražavamo u postocima:

$$r_m = \left(\frac{|\Delta\lambda_{i\,max}|}{\overline{\lambda}} \cdot 100 \right) \% \qquad (9)$$

U eksperimentalnom zadatku potrebno je izvršiti mjerenja za dvije različite udaljenosti tkanine koja predstavlja optičku rešetku i pripremljenog dijela uređaja koji sadrži pukotinu na drugoj strani letvice, te je zbog toga navedeno i da se račun slučajnih pogrešaka provede posebno za svaku udaljenost, kako bi analiza rezultata pod točkama od h) do l) bila potpunija.

h) ukratko komentirate preciznost mjerenja prema dobivenim maksimalnim relativnim pogreškama … 1 bod

Analiza r_m za dvije različite udaljenosti uključuje dvije komponente: konkretno - za koju je udaljenost mjerenje bilo preciznije i općenito - na osnovu stečenog eksperimentalnog iskustva, kratki komentar označavaju li dobiveni postotci veću ili manju pogrešku unutar pojedinog seta mjerenja. Moguće uzroke koji su doveli do nepreciznosti u mjerenjima potrebno je ukratko opisati pod točkom j).

i) usporedite dobivene rezultate za valnu duljinu sa vidljivim područjem spektra elektromagnetskog zračenja … 2 boda

Potrebno je konstatirati nalaze li se dobiveni rezultati za valnu duljinu svjetlosti unutar vidljivog područja, što bi trebao biti slučaj ako su pri mjerenjima otklonjeni oni iznosi koji su rezultirati pogreškama u mjerenjima u intervalu od 1 mm i zatim navesti interval vidljivog dijela spektra elektromagnetskog zračenja: vidljiva svjetlost obuhvaća valne duljine od 400 nm do 750 nm.

j) navedete na koji ste način postigli što veću preciznost mjerenja … 1 bod

U svakom eksperimentalnom radu potrebno je kratko i precizno iskustveno navesti što je primijećeno kao problem u mjerenjima i kako je postignuta veća preciznost. Neizostavno bi za ovaj eksperimentalni set trebalo navesti minimalno dvije komponente: - na koji je način prema eksperimentalnim uvjetima precizno određena konstanta optičke rešetke, tj. razmak između dva tkanja na prozirnoj tkanini i - na koji je način mjerena udaljenost između prve i središnje svijetle pruge (ovdje je dobro naglasiti i kako crna pozadina uz obje strane pukotine omogućava kvalitetnije uočavanje i mjerenje udaljenosti s.

Dodatno se mogu uzeti u obzir te opisati i utjecaj pozicije izvora svjetlosti, kao i same tkanine, kako bi dobivena ogibna slika bila paralelna s pukotinom i točno iznad mjerne skale, kao i drugi primijećeni problemi i način njihova rješavanja.

k) ukratko opišete što je sve tijekom mjerenja moglo uzrokovati grube pogreške … 1 bod

Za eksperimentalni set složen prema dostupnom priboru i materijalima karakteristično je da se sve veličine koje mjerimo izražavaju u cm ili mm (ili odmah prema SI sustavu u metrima) i prema tome su makroskopske, a valna duljina svjetlosti u rezultatima ima red veličine 10^{-7} m, te je stoga mikroskopska. Zbog toga mala nepreciznost u intervalu od 1 mm pri mjerenju udaljenosti prvog svijetlog maksimuma od središnjeg može značiti za određenu udaljenost pukotine od prozirne tkanine da rezultat neće biti unutar poznatog intervala vrijednosti za valne duljine vidljivog područja spektra EMZ.

Zbog osjetljivosti potrebne pri mjerenju, u odnosu na pribor koji je na raspolaganju, uzeto je u obzir pod točkom f) da se u tablicama prekriže svi rezultati za valnu duljinu koji nisu unutar vidljivog područja spektra EMZ; to ujedno znači kako je potrebno napraviti više mjerenja, a račun slučajnih pogrešaka raditi po završetku svih mjerenja i izračuna valnih duljina za pojedina mjerenja, kako bi u obzir bili uzeti samo oni rezultati eksperimentalnih mjerenja koji su u skladu s očekivanim intervalom teorijskih vrijednosti za vidljivo područje EMZ.

l) zaključno povežete svoje eksperimentalne rezultate s teorijskim odnosom promatrane pojave u ovisnosti o udaljenosti, kao i o širini pukotine … 2 boda

Eksperimentalnim radom jednostavno je uočiti kako će s manjom udaljenosti pukotine od tkanine razmaci između interferentnih pruga biti manji. Povezivanjem s teorijskim osnovama nastajanja pruga interferencije unutar ogibnih maksimuma za dvije, tj. kod optičke rešetke za N pukotina međusobno razmaknutih konstantom d, ovdje je potrebno navesti minimalno dvije značajne činjenice: - što je pukotina bliže, razmak između pruga bit će manji; - uža pukotina za istu valnu duljinu imat će šire pruge difrakcije, uz uvjet da intenzitet osvijetljenosti pruga vrlo naglo opada te se stoga preporučuje mjerenje samo prvog maksimuma.

U ovom eksperimentalnom setu nije, zbog nemogućnosti postizanja preciznijih mjerenja, trebalo istražiti ovisnost o valnoj duljini svjetlosti: za pukotinu određene širine manja valna duljina svjetlosti značit će i manji ogibni kut.

Ukupno: ……. **30 bodova**