

Určenie hrúbky ľudského vlasu pomocou difrakcie svetla

M. Gintner

Úloha:

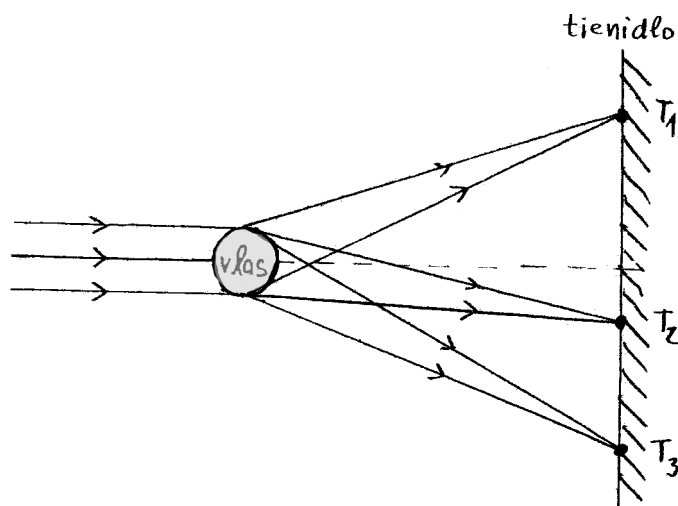
Zmerať hrúbku ľudského vlasu pomocou difrakcie svetla laserového ukazovátka.

Teória:

Keď postavíme do cesty rovinatej svetelnej vlny prekážku, ktorá časť svetla odtieni, vlna ktorá sa dostane za prekážku, zmení charakter svojho šírenia. Šíri sa za prekážku prakticky do všetkých smerov. Tomuto javu hovoríme *ohyb svetla* alebo *difrakcia* na prekážke. Dalo by sa tiež povedať, že sa lúče vychádzajúce z bodov priestoru v blízkosti prekážky šíria všetkými smermi.

V každom bode za prekážkou sa pretína viacero lúčov a dochádza k skladaniu zodpovedajúcich vln. Toto skladanie, *interferencia*, môže výsledné svetlo v danom bode zosilniť (*pozitívna interferencia*) alebo zoslabiť, prípadne úplne vynulovať (*negatívna interferencia*).

Ak do cesty rozptýleným lúčom postavíme tienidlo, môžeme na ňom pozorovať k akej interferencii došlo v bodoch priestoru ležiacich na tienidle. Uvidíme, že sa na tienidle striedajú miesta, ktoré sú výrazne osvetlené, s miestami, ktoré sú až úplne tmavé. Tomuto svetelnému vzoru na tienidle hovoríme *interferenčný obraz*. Na obr. 1 je schématicky ilustrovaná difrakcia na vlase.



Obr. 1: Difrakcia svetla na vlase a následná interferencia svetelných lúčov na tienidle.

Fyzici stoja často pred úlohou určiť tvar a rozmery prekážky na základe pozorovaného interferenčného obrazu. Predpoveď interferenčného obrazca, ktorý daná prekážka vytvorí, vychádza z jednoduchého princípu: skladanie dvoch pretínajúcich sa lúčov závisí na fázovom rozdieli ich vln v danom bode. Keď je rozdiel fáz celočíselným párnym násobkom π , dochádza k maximálnemu zosilneniu svetla. Ak je rozdiel fáz celočíselným nepárnym násobkom π , dochádza k maximálnemu zoslabeniu svetla. Pri rovnosti amplitúd oboch vln to znamená žiadne svetlo v danom bode.

Diskutovaný fázový rozdiel zase závisí na vlnovej dĺžke λ svetla a rozdieli dráh, ktoré muselo svetlo od prekážky k miestu stretu oboch lúčov prekonať. Tieto dráhy závisia jednak od tvaru a rozmerov prekážky, ako aj od vzdialenosti tienidla a polohy daného priesečníka na tienidle.

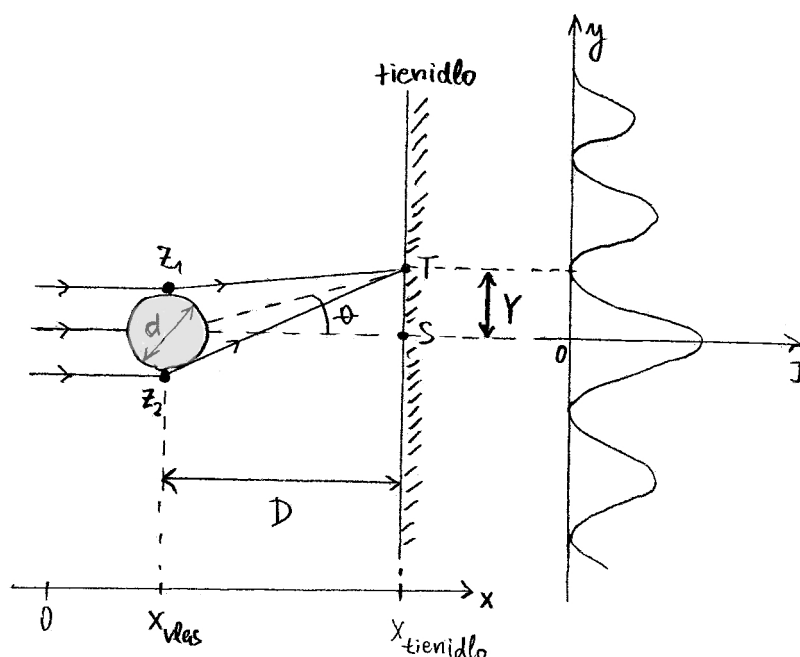
V našej úlohe postavíme svetlu do cesty ľudský vlas a z vytvoreného interferenčného obrazu sa pokúsime určiť jeho hrúbku. Aby bol tento jav na tienidle dobre rozpoznateľný voľným okom, potrebujeme použiť monochromatické svetlo. Tiež by malo byť splnené, že vzdialenosť D tienidla od vlasu je oveľa väčšia ako hrúbka vlasu d . Predpokladáme, že rovinné tienidlo je umiestnené kolmo na smer šírenia svetla pred prekážkou. Pri splnení týchto predpokladov a usporiadaní experimentu podľa schémy na obr. 2, sa dá odvodiť nasledovný jednoduchý vzorec pre minimá interferenčného obrazu na tienidle

$$d \sin \theta = n\lambda, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (1)$$

kde uhol θ je uhol, ktorý zvierajú spojnice vlas-minimum so smerom kolmým na tienidlo. Vidíme, že minima sú symetricky rozložené okolo smeru lúča dopadajúceho na vlas. V strede tohoto interferenčného obrazca sa nachádza tzv. *nulté maximum*.

Pri malých uhloch pre najbližšie minima využijeme, že $\sin \theta \approx \tan \theta \approx Y/D$, kde Y je kolmá vzdialenosť n -tého minima od stredu nultého maxima. Potom pre hrúbku vlasu dostaneme z rovnice (1) vzťah

$$d = \frac{n\lambda}{\sin \theta} = \frac{n\lambda D}{Y}. \quad (2)$$

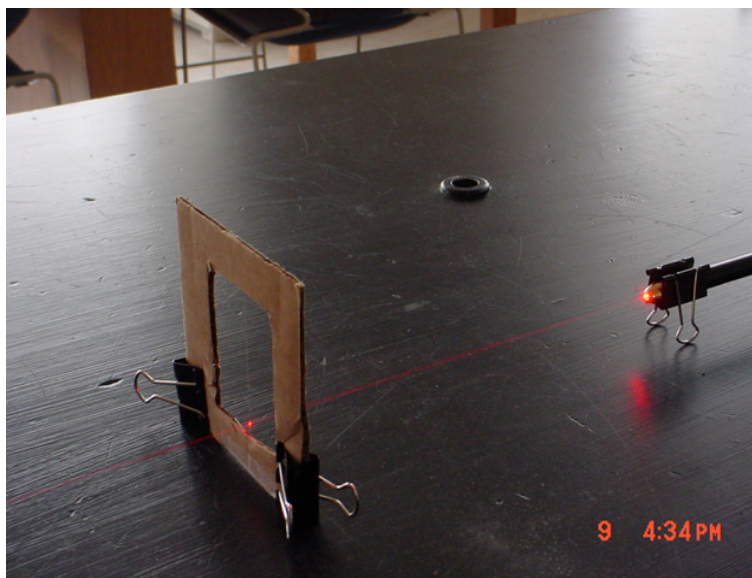


Obr. 2: Rozloženie intenzity I svetla v interferenčnom obraze na tienidle. Bod T zodpovedá prvému minimu, bod S nultému maximumu.

Pomôcky:

laserové ukazovátka so svetlom známej vlnovej dĺžky
 stojan na uchytenie ukazovátka
 stojan na uchytenie vlasu
 tienidlo
 milimetrový papier
 dĺžkové meradlo
 ľudský vlas

Konštrukcia niektorých pomôcok v zozname je ponechaná na tvorivosti a možnostiach študentov. Na obr. 3 je jednoduchý príklad, ako sa pomocou kartónu a kancelárskych klipsov na papier dá zostaviť časť aparatury. Rám z kartónu slúži na uchytenie vlasu pomocou lepiacej pásky.



Obr. 3: Jednoduchý návrh na stojany pre uchytenie vlasu a ukazovátka.

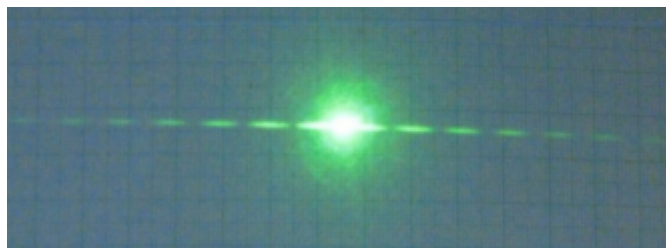
Postup:

1. Zožente si tri ľudské vlasy od rôznych osôb. Skúste si nájsť darcov s rôznymi kvalitami vlasov (prirodzená farba, jemnosť, miera zvlhnenia).
2. Skonstruuajte jednotlivé časti aparatury.
 - a) Na tienidlo nalepte milimetrový papier.
 - b) Tienidlo musí byť postavené kolmo na vyžarovaný laserový lúč.
 - c) Uchyťte jeden z vlasov do stojana, najlepšie vo zvislom smere.
 - d) Uchyťte do stojana laserove ukazovátka. V prípade potreby nájdite spôsob, ako udržať vypínač ukazovátka stlačený bez toho, aby ste ho museli držať stlačené vy. (Tip: skúste štipce na prádlo.)
3. Namierte lúč laserového ukazovátka na vlas rovnobežne s doskou stola a posúvajte tienidlo do vzdialenosti, v ktorej uvidíte interferenčný obrazec podobný tomu na obr. 4.
4. Po nájdení vhodného usporiadania aparatury a dosiahnutí uspokojivého interferenčného obrazca, zmerajte vzdialenosť D vlasu a tienidla.
5. Vyznačte na milimetrovom papieri stred nultého maxima S .
6. Odčítajte polohy y'_1 a y''_1 okrajov prvého minima.
7. Spočítajte polohu stredu prvého minima y_1^{stred} ako priemer polôh okrajov minima.
8. Spočítajte vzdialenosť Y_1 stredu prvého minima od stredu nultého maxima.
9. Vypočítajte priemer vlasu d pomocou vzťahu (2).
10. Určte priemer vlasu pomocou meraní iného interferenčného minima podľa vášho výberu. Porovnajte s výsledkom získaným na základe meraní prvého minima.
11. Experiment zopakujte pre všetky tri vlasy. Získané hrúbky vlasov porovnajte s údajmi uvádzanými v literatúre.

Kde je to vhodné, odhadnite chyby merania jednotlivých meraní a tieto použite pri výpočte chýb počítaných veličín.

Modifikácie postupu vynútené alternatívnymi konštrukciami experimentu sú prípustné. Dôležité je dosiahnuť cieľ merania.

Varovanie: Nemierajte laserovým ukazovátkom do očí sebe ani druhým osobám. Mohlo by dôjsť k permanentnému poškodeniu zraku.



Obr. 4: Interferenčný obrazec získaný osvetlením ľudského vlasu zeleným laserovým svetlom.

Vzorové dáta a výpočty:

Tab. 1: Vlnová dĺžka svetla ukazovátka.

λ [nm]	532 ± 10
----------------	--------------

Tab. 2: Poloha stredu nultého maxima.

y_0 [mm]	3 ± 1
------------	-----------

Tab. 3: Poloha vlasu, poloha tienidla a ich vzájomná vzdialenosť.

x_{vlas} [cm]	x_{tienidlo} [cm]	D [cm]
27.00 ± 0.05	151.7 ± 0.1	124.70 ± 0.11

$$D = |x_{\text{tienidlo}} - x_{\text{vlas}}|, \quad \sigma_D = \sqrt{\sigma_{x_{\text{tienidlo}}}^2 + \sigma_{x_{\text{vlas}}}^2}$$

Tab. 4: Polohy okrajov a stredu prvého minima a vzdialenosť stredov prvého minima a nultého maxima.

y_1' [mm]	y_1'' [mm]	y_1^{stred} [mm]	Y_1 [mm]
8 ± 1	13 ± 1	...	...

$$y_1^{\text{stred}} = \frac{y_1' + y_1''}{2}, \quad \sigma_{y_1^{\text{stred}}} = \sqrt{\dots}$$

$$Y_1 = y_1^{\text{stred}} - y_0, \quad \sigma_{Y_1} = \sqrt{\dots}$$

Výpočet hrúbky vlasu z polohy prvého minima:

$$d = \frac{n\lambda D}{Y_1}, \quad \sigma_d = \sqrt{\dots}$$