9) Hullámoptika

Tartalom

Kulcsfogalmak 2
1. Kísérletek hullámkáddal 3
a) Hullámok visszaverődése síkfelületről 4
b) Körhullámok interferenciája 5
c) Hullámok elhajlása résen 5
d) Hullámok elhajlása kettős résen 6
2. Réselhajlási jelenség bemutatása 6
3. Drótszál (vagy tű) elhajlási képének bemutatása 8
4. Emelt szintű érettségi mérés: A fényelhajlás jelensége optikai rácson, a fény hullámhosszának meghatározása 10
5. Keresztrácson elhajló fény interferenciaképének bemutatása 11
6. Egy speciális reflexiós rács (CD) "rácsállandójának" meghatározása He-Ne lézerfény elhajlási interferogramjából. 12
7. Newton színes gyűrűinek észlelése, kivetítése 14

Kulcsfogalmak

- Hullámhossz, frekvencia, terjedési sebesség
- Elemi hullámok, hullámok szuperpozíciója, Huygens-elv, Huygens-Fresnel elv
- Hullámok visszaverődése, törése
- Hullámok találkozása, koherens hullámok, hulláminterferencia
- Hullámok elhajlása (diffrakció)
- Rácsinterferencia

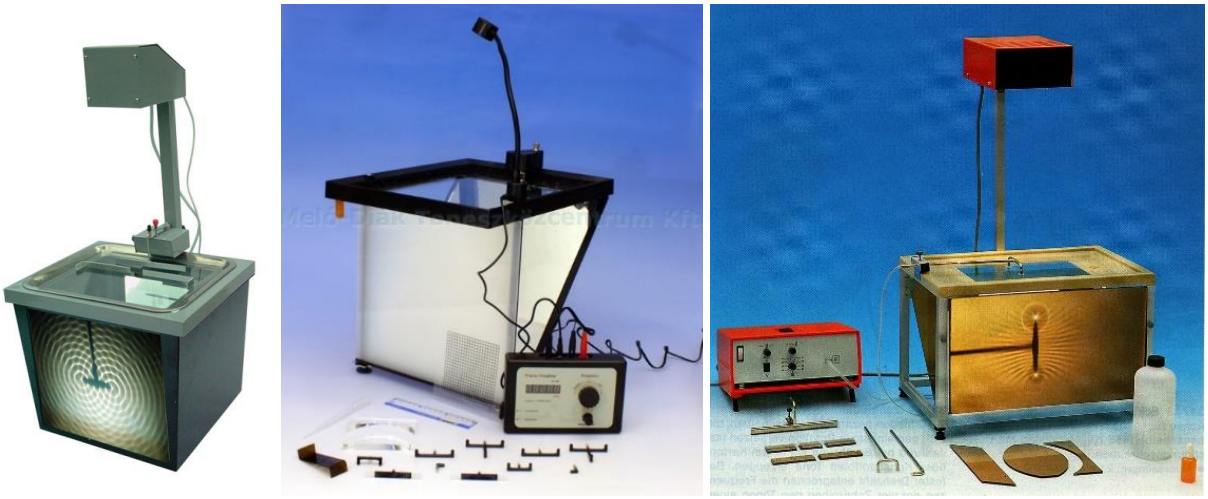
1. Kísérletek hullámkáddal

A kísérletek célja

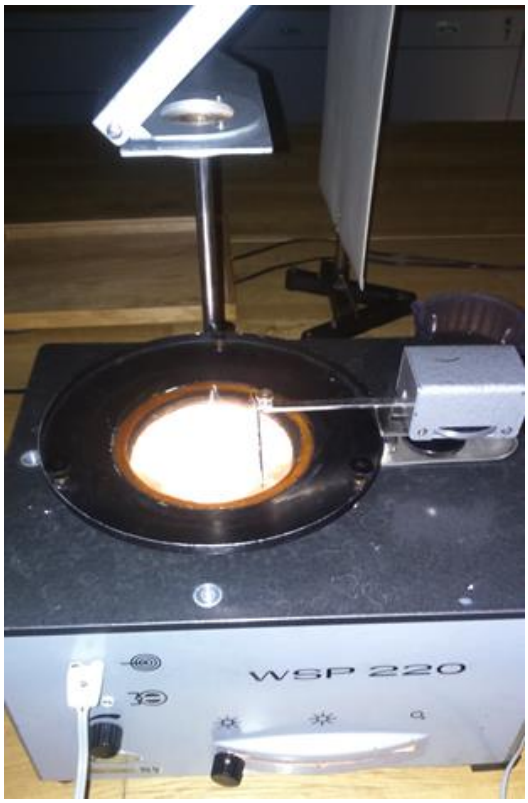
A hullámkád segítségével víz felszínén keltett – megközelítőleg – harmonikus transzverzális hullámokat tanulmányozhatunk. A beépített lámpa segítségével a hullámtér képe kivetíthető a függőleges ernyőre – vagy akár falra. A megvilágítás stroboszkóppal történik, melynek frekvenciát szabályozhatjuk, így a hullámok frekvenciájával történő megvilágítás esetén „megállítható” a kép. A vetített képen láthatók a hullámfrontok, melyek pontszerű hullámforrás esetén koncentrikus körök, egyenes hullámforrás esetén pedig párhuzamos egyenesek. A hullámfrontok távolsága a hullámhossz, ami a hullám frekvenciájától és a hullám adott közegbeli terjedési sebességétől függ ($c = \lambda f$). A terjedési sebességet a vízmélység állításával lehet szabályozni. Mélyebb vízben a terjedési sebesség nagyobb, s így a hullámhossz is nagyobb. A hullámkáddal rendkívül szemléletesen, többfajta kísérletet végezhetünk a hullámok viselkedésének demonstrálására.

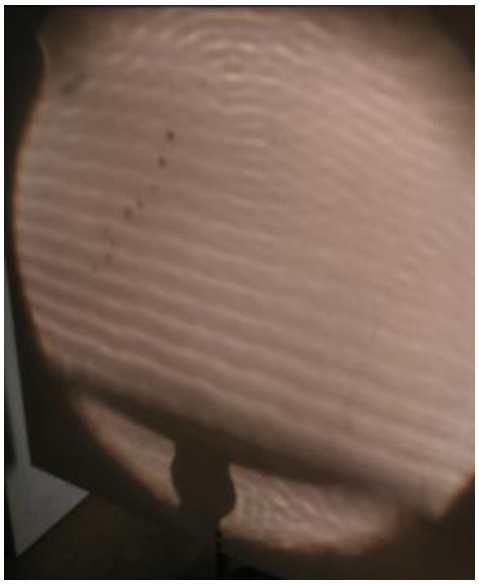
Szükséges anyagok, eszközök

- Hullámkád stroboszkóppal
- Hullámkádba való hullámforrások, „akadályok”
- Ernyő
- Víz, injekciós tű (a finom adagoláshoz)



Különböző hullámkádak (forrás: taneszköz.hu, puskás.hu)



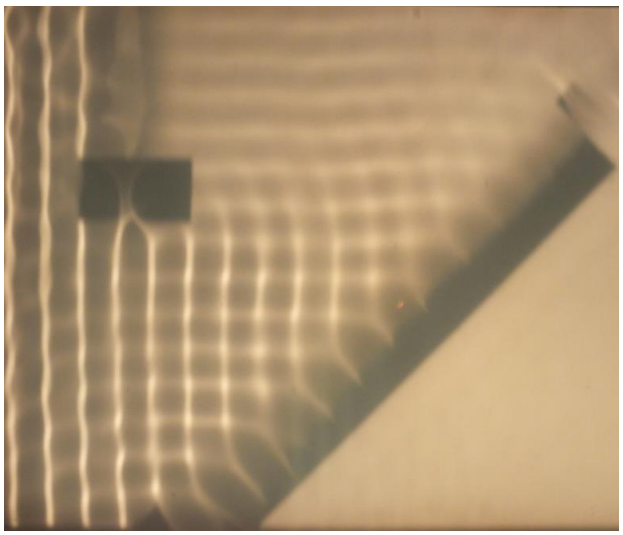


Hullámkád egyeneshullámok létrehozása közben, a kivetített stroboszkópos képpel. A hullámkád gyakorlatilag nem más, mint egy rezgő hullámkeltővel és kis káddal felszerelt írásvetítő.

a) Hullámok visszaverődése síkfelületről

Leírás

A hullámok útjába helyezzünk egyenes felülettel határolt akadályt. Figyeljük meg a vetített képen a visszaverődő hullámokat. A kísérletet végezzük el kör- és egyenes hullámokkal is! Megfigyelhetjük, hogy a hullámok szabályosan verődnek vissza, vagyis a beeső és visszavert hullámfrontok azonos szöget zárnak be az akadállyal – illetve a beesési merőlegessel. A megfigyelést nehezíti, hogy az akadályról visszaverődő, és az arrafelé haladó hullámok interferenciáját látjuk. Használhatunk más alakú akadályokat is: például a parabola alakú akadály a tengelyére merőleges egyenes hullámokat egy pontba gyűjti össze



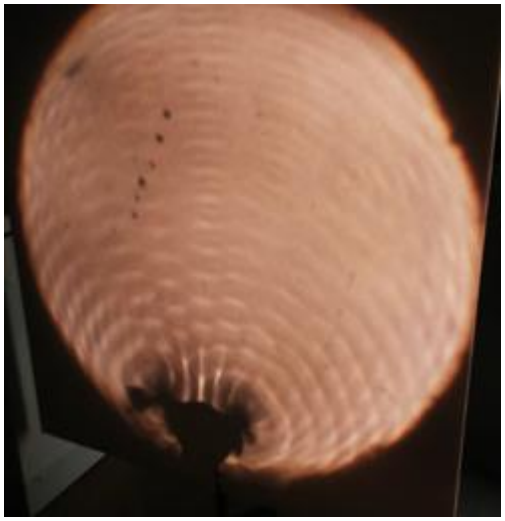
Elméleti és módszertani kérdések

- Készítsen táblai ábrát a sík felületen történő visszaverődés szemléltetéséhez egyenes hullámok ferde beesése esetén!

- Készítsen táblai ábrát a sík felületen történő visszaverődés szemléltetéséhez körhullámok esetén!
- Milyen hullámokat vár, ha a pontszerű hullámforrást a parabola alakú akadály gyújtópontjába helyezi?

b) Körhullámok interferenciája

Leírás



Interferencia figyelhető meg, ha a találkozó két – vagy több – hullám koherens – azaz fáziskülönbségük időben állandó. Felületi hullámok esetében interferencia a hullámkádban legegyszerűbben úgy valósítható meg, ha a hullámok két, szinkronban rezgő forrásból származnak. Az ábrán főként a kioltási helyek megfigyelhetők meg – itt nincsenek hullámok, így árnyék sem. Ezek egy-egy hiperbola íven helyezkednek el, ahol a hullámok útkülönbsége a félhullámhossz páratlan számú többszörösei.

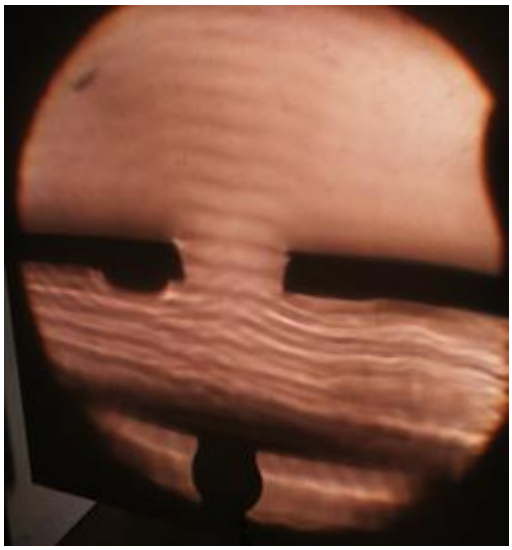
Elméleti és módszertani kérdések

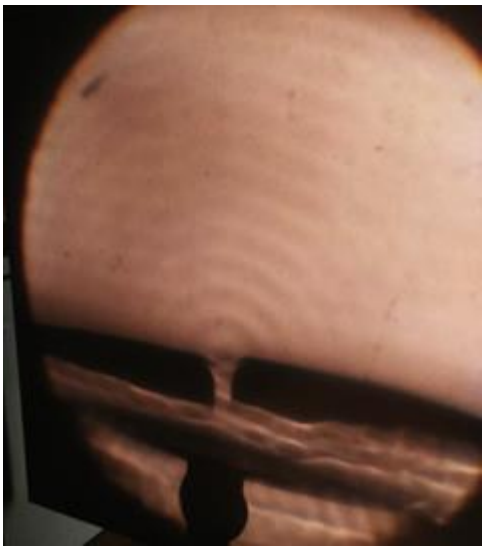
- Készítsen táblai ábrát a két pontszerű forrásból induló körhullám interferenciájának bemutatására! Szemléltesse az erősítési és kioltási helyekhez tartozó hullámforrásoktól vett útkülönbségeket is!
- A frekvencia növelésével hogyan változik a kioltási vonalak közötti távolság?

c) Hullámok elhajlása résen

Leírás

Helyezzünk egyenes hullám útjába két akadályt, melyek közötti résen áthaladhat a hullám. Állítsuk be a rés szélességét először a hullámhossznál jóval nagyobbnak, majd a hullámhosszal összemérhetőnek, végül a hullámhossznál jóval kisebbnek. Széles rés esetén az akadályok mögött éles árnyéktér található. Ha a rés szélessége a hullámhosszal összemérhető, akkor a hullámok szélei „elgörbülnek”, és a hullám kissé behatol az akadály árnyékterébe, s az előző mérésben látható interferencia-mintázat alakul ki. Szűk rés esetén az elhajlás szinte teljes, vagyis a hullám az akadály mögé teljesen behatol, ám amplitúdója erősen csökken.



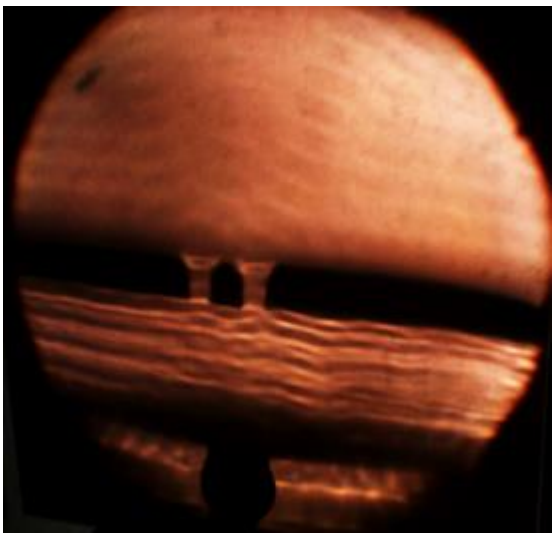


Hullámok elhajlása különböző szélességű résen

Elméleti és módszertani kérdések

- Magyarázza a szűk rés esetén átjutó hullám alakját a Huygens-elv segítségével!

d) Hullámok elhajlása kettős résen



Leírás

Helyezzünk egyenes hullám útjába három – két nagyobb és középen egy kicsiny – akadályt, melyek közötti réseken áthaladhat a hullám. Figyelje meg a rések mögött kialakuló mintázatot!

Elméleti és módszertani kérdések

- Melyik korábbi kísérletben kapunk hasonló mintázatot? Mi a hasonlóság magyarázata?
- Milyen mintázatot vár az akadályok mögött kialakulni, ha a bejövő hullámok nem egyenes, hanem kör hullámok?

2. Réselhajlási jelenség bemutatása

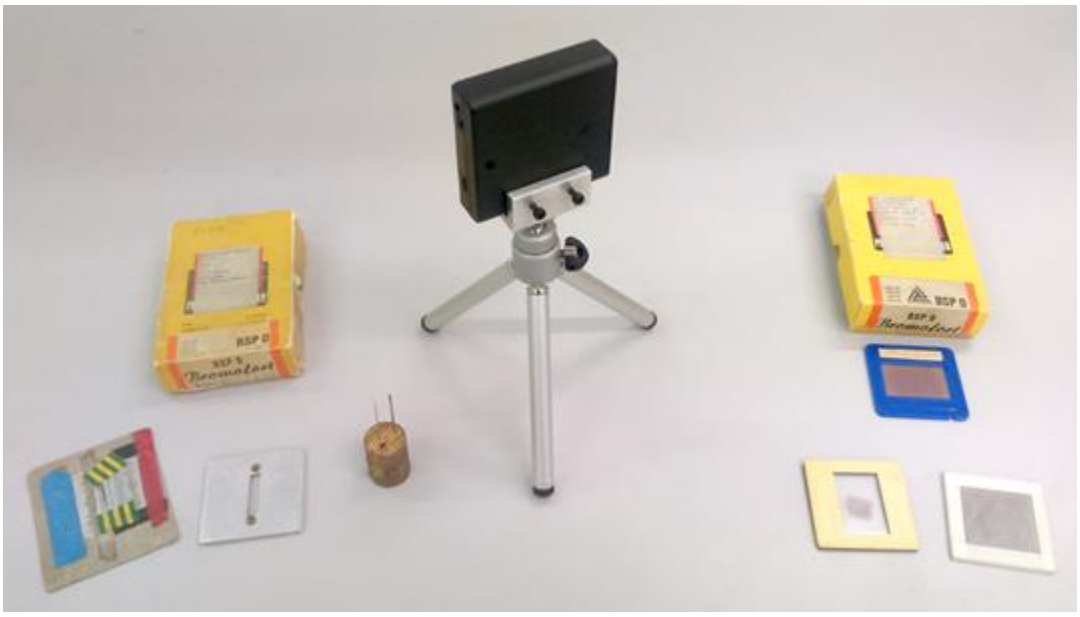
A kísérlet célja

A hullámkádas kísérletek esetén már látható volt a keskeny résen történő elhajlás esetén létrejövő interferenciamintázat. A jelenség természetesen fényhullámok esetén is látható, sőt, a hullámkádas esetnél talán még jobban is. A jelenség fontosságát az adja, hogy magyarázni csak a fény hullámtermészetével lehetséges!

Szükséges eszközök

- Lézer fényforrás

- Változtatható szélességű rés
- Ernyő (zsírpapír), (esetleg optikai pad)

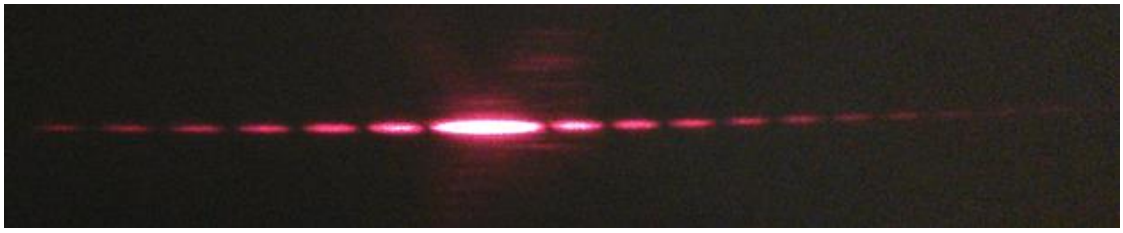


Fényelhajlási jelenség további bemutatásához is használható eszközök: (balról jobbra) borotvapenge-rés, vékony kifeszített drótszál diakeretben, dugóba szúrt tű, lézer fényforrás állványon, sűrű szövésű drótháló (keresztrács), kék keretben optikai rács, textil keresztrács

Leírás

A kísérlet sikerének feltétele, hogy a rés szélessége a lehetőleg kicsi legyen. A lézernyalábbal – monokromatikus fénnyel – a rést merőlegesen világítsuk meg, s az ernyőt a réstől kellő távolságban – kb. 1 m – helyezzük el. Az ernyő persze ne legyen túl távol a réstől, mert akkor a fényintenzitás olyan alacsony lehet, hogy a jelenséget nem lehet szabad szemmel érzékelni. (Ha a zsírpapíros ernyőt alkalmazzuk, célszerű az ernyő nem megvilágított oldalról megfigyelni a jelenséget.)

Optikai sínen lézerrel megvilágított változtatható szélességű rés és a kialakuló mintázat



A résen elhajló fény által az ernyőn kialakuló minta

Feladatok

- Kísérleti megfigyelése alapján határozza meg, hogyan változik az elhajlás mértéke a rés méretének növelése esetén?
- Piros helyett zöld lézert alkalmazva hogyan változik az elhajlás mértéke?

Elméleti és módszertani kérdések

- Fehér fény alkalmazása esetén milyen elhajlási képet kapunk? Miért?

3. Drótszál (vagy tű) elhajlási képének bemutatása

A kísérlet célja

Elhajlás természetesen nem csak rés esetében, hanem – a hullámkádhoz hasonlóan – vékony, éles akadály esetén is létrejön. A jelenséget szemléletesen bemutathatjuk lézerfény és vékony drót (tű) segítségével.

Szükséges eszközök

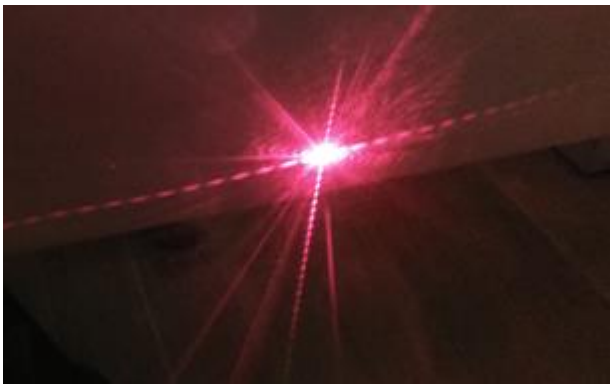
- Lézer fényforrás
- Vékony drót, tű

- Ernyő (zsírpapír), (esetleg optikai pad)

Leírás

Az összeállítás nem különbözik jelentősen a résen való elhajlásétól. A rés helyére helyezze a diakeretbe fogott drótszálat, majd később a dugóba szúrt tűt.

Drótszál megvilágítása lézerrel



Drótszál lézeres megvilágítása esetén létrejött mintázat

Feladatok

- Milyen lényeges különbség figyelhető meg a vékony drótszál és a tű megvilágításával nyert mintázatok között?
- Piros helyett zöld lézert alkalmazva hogyan változik az elhajlás mértéke?

Elméleti és módszertani kérdések

- Fehér fény alkalmazása esetén milyen elhajlási képet kapunk? Miért?

4. Emelt szintű érettségi mérés: A fényelhajlás jelensége optikai rácson, a fény hullámhosszának meghatározása

A kísérlet célja

Optikai ráccsal bemutatott fényelhajlási kísérlet segítségével határozza meg a fény hullámhosszát!

Szükséges eszközök

- Kis teljesítményű fénymutató-lézer (háromlábú kisállványon)
- Optikai sín lovasokkal
- Ernyő
- Ismert rácsállandójú optikai rács
- Mérőszalag, vonalzó.

Leírás

Az optikai sín végére rögzítsünk széles ernyőt, az ismert rácsállandójú optikai rácsot helyezzük a sínen mozgatható lovasba tett diatartóba, majd a rácsot világítsuk át lézerfénnyel! A lézerfény a rácson áthaladva elhajlik. Az ernyőn szimmetrikusan megjelenő interferenciamaximumok nappali világításban is jól láthatók

Feladatok

- Mérje le az optikai rács és az ernyő távolságát, valamint az ernyőn az első elhajlási maximum és a direkt sugár foltjának (középső, legerősebb megvilágítású folt) távolságát!
- A mért hosszúságadatokat és az optikai rács megadott rácsállandóját felhasználva határozza meg a lézerfény hullámhosszát!
- A mérési hiba csökkentésére ismételje meg a hullámhossz meghatározását más ernyő – rács távolságok esetén is! A különböző mérések során kapott λ értékeket átlagolja!

5. Keresztrácson elhajló fény interferenciaképének bemutatása

A kísérlet célja

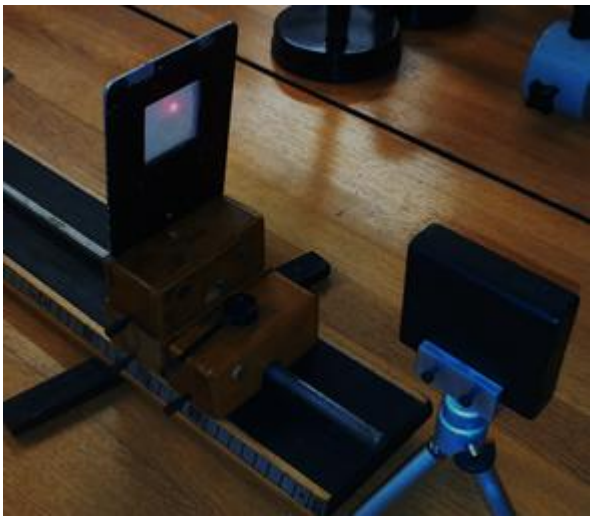
Az előbb bemutatott érettségi mérés csak oldal irányban mutatja be a rácson történő fényelhajlás jelenségét. A természetben azonban gyakoribb a „kétdimenziós” fényelhajlás, melynek egy egyszerű és szemléletes esete a keresztrácson történő elhajlás esete.

Szükséges eszközök

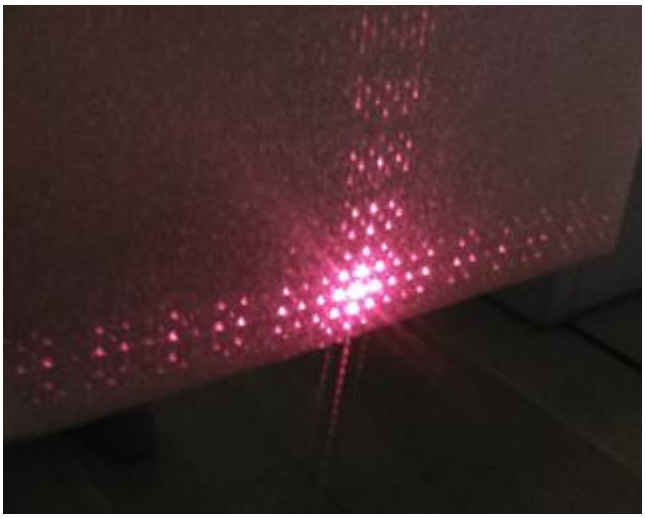
- Lézer fényforrás
- Sűrű szövésű fém vagy textil szitaszövet (keresztrács)
- Ernyő (zsírpapír)
- Optikai pad

Leírás

Az előbbi – érettségi mérés – berendezésébe a rács helyére sűrű fém vagy textil szitaszövetet helyezünk. Mivel ez a szövet két egymásra merőleges rácsból áll, a kialakuló interferenciakép is az előzőhöz képest kétdimenziós mintázatot eredményez.



Textil szitaszövet (keresztrács) megvilágítása lézerrel



Textil szitaszövet (keresztrács) megvilágításával nyert interferencia mintázat

Feladatok

- Piros helyett zöld lézert alkalmazva hogyan változik a kialakuló mintázat?

Elméleti és módszertani kérdések

- Fehér fény alkalmazása esetén milyen képet kapunk? Miért?

6. Egy speciális reflexiós rács (CD) "rácsállandójának" meghatározása He-Ne lézerfény elhajlási interferogramjából.

A kísérlet célja

CD-ről visszavert fénynyaláb a finom rácsstruktúrán elhajlást szenved. Az elhajlást követő interferencia révén az erősítési rendek jól láthatók. Alkalmas elrendezés esetén – ismert hullámhosszúságú fényt használva – a lemez „rácsállandója” meghatározható.

Szükséges eszközök

- Lézer fényforrás
- Lyukkal ellátott ernyő
- CD, dugós állvány
- Mérőszalag / vonalzó

Leírás

A rácsállandó méréséhez állítsuk be a lézermutató vízszintes nyalábjára merőlegesen lyukas ernyőt. A nyaláb haladjon át a lyukon! Rögzítsük a CD-t az ernyő mögött, az ernyővel párhuzamosan! A nyaláb a diszk vízszintes átmérőjére essen! Ilyen elrendezés mellett a CD-n elhajló nyalábok nullad-rendje nagyjából a beeső nyaláb irányába, a többi rend pedig vízszintes síkba verődik vissza. Az ernyőn – a lyukra szimmetrikusan – két elhajlási rend négy fényfoltja jelenik meg, magasabb rendű elhajlást nem tapasztalunk.

Mivel harmadrendű (n=3) elhajlást már nem tapasztalunk, a

$$\sin\alpha_n = \frac{n\lambda}{d}$$

összefüggés alapján arra következtethetünk, hogy a rácsállandó $3\lambda \geq d \geq 2\lambda$ határok között mozog (azaz vörös lézer esetén λ = 652 nm, így 1,95 μm > d > 1,3 μm).

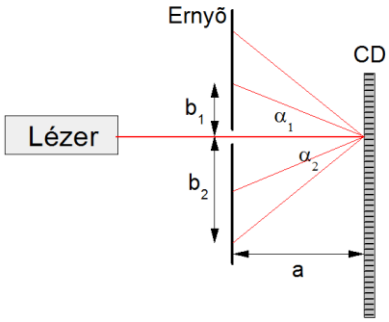
A rácsállandó pontos meghatározásához az $\alpha_{1,2}$ elhajlási szögeket kell megtudnunk. A szögeket tangens értékekből számíthatjuk:

$$\mathrm{tg}\alpha_1 = \frac{b_1}{a} \text{ és } \mathrm{tg}\alpha_2 = \frac{b_2}{a}$$

ahol b_1 és b_2 a nulladrendtől (lyuktól) mért távolsága az egyes rendeknek megfelelő foltoknak, a pedig a diszk és ernyő közötti távolság. Így

$$d = \frac{n\lambda}{sin\alpha_n},$$

ahol n = 1, illetve 2.



Bal fent: megvilágított lyukas ernyő; bal lent: összeállítás elvi vázlata; jobb: CD elhelyezése a lyukas ernyő mögött, a kialakuló mintázattal

Feladatok

- Az első és másodrendű elhajlások segítségével határozza meg a CD „rácsállandóját”!

Elméleti és módszertani kérdések

- Egyszerű fehér fénnyel megvilágítva milyen mintázatot kapnánk? Válaszát indokolja!

Becslési feladat:

Legalább hány Mbyte a CD kapacitása? Ennek a kérdésnek a megválaszolásához elsősorban azt kell tudni, hogy hány kis vájat van a CD-n – hiszen a két bites (1 és 0) információt vájat-nem vájat formában könnyen kódolhatjuk. Ehhez kell becsülnünk egy-egy vájat területét ($\approx d^2$) és a CD teljes felületének $A_{CD}=\pi(R^2-r^2)$ nagyságát – ahol R a CD külső r a CD belső sugara. Így a CD kapacitását az alábbi összefüggéssel becsülhetjük:

$$C = \frac{A_{CD}}{d^2}$$

- Mérései alapján becsülje meg egy adattárolási CD kapacitását!

7. Newton színes gyűrűinek észlelése, kivetítése

A kísérlet célja

Átlátszó testek a legragyogóbb színeket mutatják, ha elég vékony lemezeket v. hártyákat képeznek. Mindenki gyönyörködött a szappanbuborékok színében, de vajon mi adja a buborékok színét?

Szükséges eszközök

- Izzó (12V, 100W), kondenzorlencse (itt dupla lencsés gyűjtőlencse, kívül sík lapokkal), optikai sín
- 2 db ernyő
- Newton eszköz
- Vetítőlencse (f=15-20 cm, egy régi fényképező objektíve, vetítőlencseként használva)

Leírás

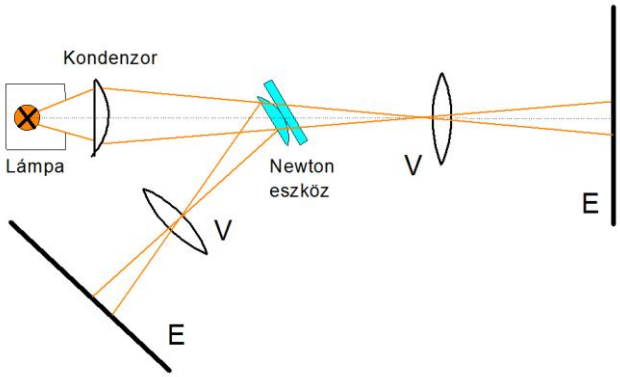
A szappanhártyák esetében a színek létrejöttét a jól ismert vékonyréteg interferenciával magyarázhatjuk. A különböző színekért pedig a buborék különböző vastagságai tehetnek, hiszen a különböző hullámhosszúságú fényeket más-más szög alatt erősíti, vagy éppen gyengíti. Jelen esetben a jelenség előállítására egy gyári eszközt használunk, melyben egy egyik oldalán sík, másik oldalán domború üvegfelület van egy teljesen sík lemezhez érintve (természetesen a domború felével).

Fényképezőgép objektív (menetes fele az ernyő felé álljon), és a Newton-készülék

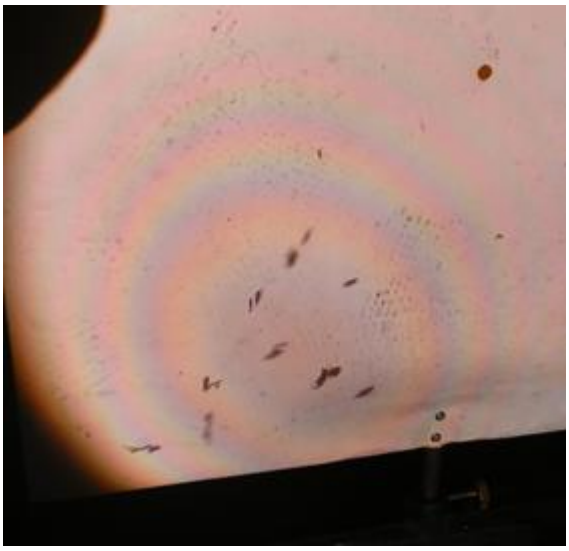
A jelenség átmenő és visszavert fényben is kivetíthető (ez utóbbi a kontrasztosabb). A fényforrás fényét a (nem rövid gyújtótávolságú) kondenzorral az optikai padra kissé ferdén állított eszközre gyűjtjük, de csak annyira, hogy az egész üvegfelület meg legyen világítva.

A köralakú interferenciagörbék az eszközről visszavert, illetve az azon áthaladó fénnyel (megfelelő vetítőlencsével f = 15 - 20 cm) leképezhetők. Fehér fénnyel néhány színes gyűrű látható. Vörös – vagy bármely monochromatikus – fényben (színszűrővel) erőteljesebb a jelenség, s látható gyűrűk száma is lényegesen nagyobb.

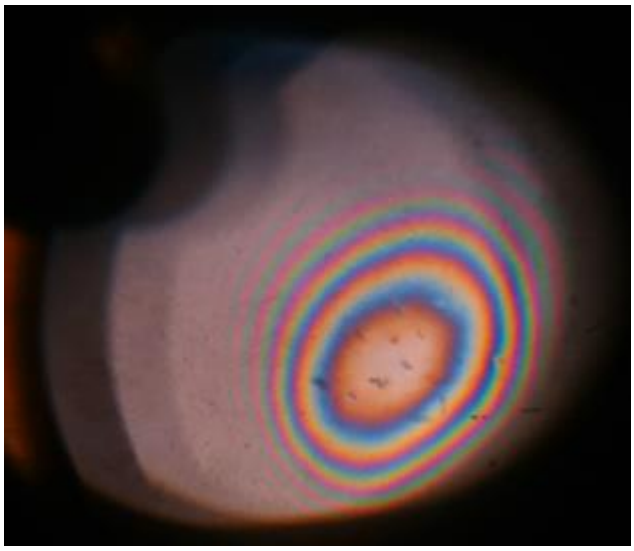
Kísérleti összeállítás a direkt ernyő nélkül



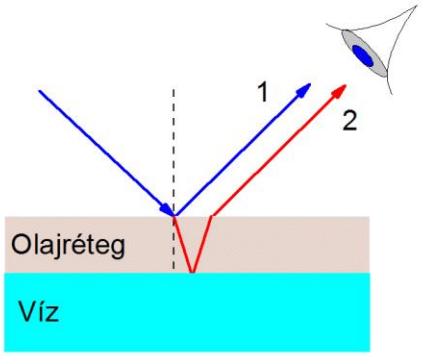
A kísérleti összeállítás elvi vázlata – a lencséket úgy állítsuk be, hogy az ernyőkön a lehető legkontrasztosabb képek jöjjenek létre.



Átmenő fényben kirajzolódó színes Newton-gyűrűk



Visszavert fényben kirajzolódó színes Newton-gyűrűk

Elméleti és módszertani kérdések

- Becsülje meg egy tócsán úszó olajfolt vastagságát!