

## *A fénytán gimnáziumi tananyagának vázlata*

1973 áprilisában a módszertani napok keretében a fénytán gimnáziumi, tanításáról volt szó. Az itt leírt összeállítás órák szerinti áttekintésben sorolja fel a tananyagot, egyes helyeken felhívja a figyelmet speciális kísérletekre és gondolatmenetekre. Az óraszám a tagozatos osztály lehetőségeihez igazodik, rendes osztályokban kihagyások, rövidítések szükségesek.

1. A fénysugár fogalma. A fénysugár nem látható, mint egy tárgy oldalról, akkor észleljük, ha a szemszögbe vagy fényképezőgépbe jut be, és okát az utolsó darabjának visszafelé rajzolt érintőjében keressük. Példák: árnyékjelenségek, sötétkamra. Feladat, kérdés: milyen árnyékot ad egy kerek fényforrás négyzet alakú lemezről; miért csak akkor éles a villa árnyéka, ha szárai párhuzamosak a gyertya lángjával?

2. A visszaverődés törvénye a fénytani korongon történt mérés alapján. A törvény következménye: a síktükör képalkotása. Megvizsgálása tanulói kísérletben a fénykapus eljárással (Bártfai Tamás cikke, A fizika tanítása, 1962. 4. sz. 7. o.).

3. A képalkotás fogalma: pontból kiinduló sugarak ismét pontban találkoznak. Ennek virtuális esete valósul meg a síktükörnél. A síktükör képének tulajdonságai. (Egy kérdés: ha a tükör megfordítja a bal és jobb oldalt, miért nem fordítja meg az alul-felül irányokat? Középisk. Matematikai Lapok, 1962. 8-9. sz. 183. o.).

4. Problémák a síktükrök köréből: szögtükör, távolságmérő. Feladatok: mekkora tükrökben látja magát az ember? Periszkóp.

5. A homorú gömbtükör viselkedése. A tükrőtörvény levezetése a visszaverődés törvényéből.

6. A homorú gömbtükör képének szerkesztése (szerkesztő sugarak: a tengellyel párhuzamos sugár és a gömb középpontján átmenő sugár). A reális kép nézése szemmel.

7. A képalkotás egyes eseteinek végignézése. Mindegyik eset kísérleti bemutatása, mindegyikre szerkesztési példa, a gyakorlati vonatkozások megemlítésével.

8. A domború gömbtükör, képszerkesztés, a kép tulajdonságai.

9. Feladatok a gömbtükrök köréből, esetleg kísérlet, megfigyelés alapján. (A Csendes-óceán fölött 20 km magasan repülő pilóta a feje fölött levő igazi Holdat vagy annak tükröképét látja-e nagyobbak? Ha az opálámpaburában az egyik falon megjelenik az izzószál éles képe, akkor hol helyezkedik el az izzószál?)

10. A fénytörés törvénye. Először kvalitatív megfigyelés annak megállapítására, hogy a beeső, a megtört fénysugár és az általunk elképzelt beesési merőleges egyetlen síkban vannak, amely természetesen merőleges a közeg határfelületére. Azután a fénytani korongon mérőkísérlet  $20^\circ$ -os,  $40^\circ$ -os,  $60^\circ$ -os és  $80^\circ$ -os beesési szögekkel. Eleinte úgy tűnik, a beesési és törési szögek egyenesen arányosak, de az arányosság megszűnik. Snellius és Descartes

felismerték, hogy a szögek sinusai egyenesen arányosak. A törvény megvizsgálása saját adatainkon.

11. A törésmutató fogalmának pontos megállapítása. Legegyszerűbb, ha vákuumból anyagba menő fénysugárra szorítkozunk. Ekkor a törésmutató 1-nél mindig nagyobb. Az optikailag sűrűbb és ritkább szavak használata fölösleges. A teljes visszaverődés.

12. Feladatok, egyszerű kísérletek a töréstörvényről, a teljes visszaverődésről, például a vízbe mártott bot látszólagos megtörése stb. Feladat lehet a vízből üvegbe menő fénysugár irányának megállapítása. Tanulói kísérlet a töréstörvényre a már említett fénykapus eljárással.

13. A planparalel lemez viselkedése, kísérlettel és számítással. A prizma viselkedése; ez esetben egy konkrét fénysugár útjának végigszámolása. Ez utóbbi egyszerűsíthető, ha a fénysugarat az egyik lapra merőlegesen ejtjük be. A diszperzióra még nem kell felhívni a figyelmet.

14. A lencsék viselkedése. Feladat annak megmutatása, hogy a lencse leképezési törvénye a fénytörés törvényének következménye. Legegyszerűbb esetben ez történhet úgy, hogy két-három praktikus megválasztott fénysugár útját számítással követjük a lencsén keresztül. Vagy plankonvex lencse sík lapjára a tengellyel párhuzamosan ejtünk fénysugarat, ennek útja könnyen számítható. Az általános eset számítása sem nehéz. Mindegyik esetben fel kell hívunk a figyelmet az elkerülhetetlen közelítésekre és azok megengedhetőségét taglalni kell. Mindezt a fénytani korongon történő bemutatás kíséri.

15. A lencse fókusz távolsága, mint az előző órai számítás eredménye. A kép szerkesztése. A reális kép nézése szemmel. A lineáris nagyítás.

16. A gyűjtőlencse képalkotási eseteinek végigtekintése bemutatással, szerkesztéssel, a gyakorlati alkalmazásra való hivatkozással. Összefoglalás: a reális és virtuális képeket a fókusz, a nagyított és kicsinyített képeket a kétszeres fókusz választja el.

17. Tanulói kísérlet a lencsetörvényről. Fényforrás lehet kisebb-nagyobb izzólámpa, például gépkocsi stoplámpája kis dobozban. A probléma feladható úgy, hogy meghatározandó a lencse fókusz távolsága több mérésből mint középérték. Vagy  $t$  és  $k$  összefüggésének grafikonja.

18. Feladatok a gyűjtőlencséről. A szokásosakon kívül például: mekkora a Nap képe 2 méteres fókusz távolságú gyűjtőlencsével előállítva? Ha a fényforrás és ernyő távolsága adott, hová kell tenni a lencsét, hogy képet kapjunk? Vagy adott lencsénél mikor legkisebb a tárgy és kép egymástól mért távolsága?

19. A szórólencse rövid tárgyalása. A két szerkesztő sugár megmutatja a képalkotás mikéntjét.

20. Összefoglaló példák a lencsék köréből. Például kézi nagyító a tisztán látás távolságának bevonásával. Vagy folyadék törésmutatójának mérése, óraüvegbe öntve a plankonvex lencse fókusz távolságának lemérésén keresztül (Veres: Fizikai kísérletek – fizikai feladatok 127. o.).

21. A szem. A leképező rendszer: csarnokvíz és kristálylencse. Az ideghártya szerkezete: csapok és pálcikák, ezek mindegyikének tulajdonságai. A felbontóképesség határa.

22. A mikroszkóp. A sugármenet praktikus rajzához alkalmas adatok például: 10 mm fókusztávolságú tárgylencse elé 12 mm távolságban 2 mm nagyságú tárgyat állítunk és erről 60 mm távolságban 5-ször nagyított, 10 mm nagyságú képet kapunk. A 15 mm fókusztávolságú szemlencsét úgy helyezzük el, hogy az előbbi reális kép 10 mm-es távolságban legyen tőle (a lencsék távolsága 70 mm), ekkor a virtuális kép a lencsétől 30 mm-re, 30 mm-es nagyságban, 3-szor nagyítva jelenik meg. A teljes nagyítás  $5 \cdot 3 = 15$ . Az egyes lencsék sugármenetének rajza és számítása szerepelhet az előző órákon, előkészítésként. A mikroszkóp felbontóképességének a szerepe.

23. A távcső a Kepler-féle távcső példáján. Rajzolásra alkalmas adatok: tárgylencse 4 cm átmérőjű, fókusztávolsága 6 cm, a szemlencse átmérője 3 cm, fókusztávolsága 2 cm. A lencsék távolsága természetesen 8 cm.  $5^\circ$ -os szögben beeső párhuzamos nyaláb  $15^\circ$ -os szöggel távozik ebből a rajzolt távcsőből. A csillagok (ún. állócsillagok) pontszerű fényforrások, ezek matematikailag számított képe egyetlen ideghártyabeli csap vagy ezüstbromidszemcse területére esik, tehát a nagyítás nem számít, csak az, hogy a távcső nagy átmérőjével a felfogott fény mennyiségét növeli.

(Ezzel véget ért az ún. geometriai optika, amelyben a fénysugarak számunkra egyenesek voltak, amelyek menetét a visszaverődés és törés törvényei szabták meg. Innentől kezdve, az ún. fizikai fénytanban az a vezérlő probléma, hogy mi a fény, mi történik a fénysugárban? Mint átmenet szerepel a fotometria, ahol a fény erőssége iránt érdeklődünk, hiszen eddig nem kérdeztük, hogy a vonalként rajzolt fénysugárban mennyi fény halad. Továbbá a fénysebesség kérdése, amikor aziránt érdeklődünk, hogy a vonalként rajzolt fénysugárban milyen gyorsan halad a fény. Ezek a kérdések már túlmennek a szorosan vett geometriai fénytanon.)

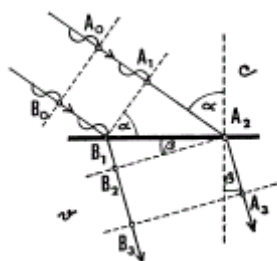
24. Fotometria. Két fogalom megkülönböztetése szükséges: a fényforrás erőssége és a megvilágítás erőssége. A fényforrás erőssége azt jelenti számunkra, mennyi szemünk számára használható teljesítményt sugároz ki az illető fényforrás, egysége, a kandela egy megállapodás eredménye. A megvilágítás erőssége azt jelenti, hogy egy felület számunkra mennyire világos, mennyi szem által használható wattot kap  $\text{cm}^2$ -enként. Egysége a lux a kandelából származtatandó. A fényforrás erősségének és a megvilágítás erősségének az összefüggése.

25. A fény terjedési sebessége. A fénynek a fénysugárban való terjedési sebességét kísérletileg sikerült meghatározni. Az Olaf Römer-féle megfigyelés érthetőbb, ha kerekített számokkal mondjuk el: az Io keringési ideje 1 nap és a Jupiter árnyékából való kilépését éjjélkor figyelték meg. Fél év múlva nem éjjélkor, hanem éjjél után 16 perc 40 másodperckor lépett ki az árnyékból, mert most a fénynek 300 millió km-rel többet kellett megtennie, így a sebesség  $300 \cdot 10^6 \text{ km} : 1000 \text{ mp} = 300\,000 \text{ km/mp}$ . Fizeau fogaskerékes kísérlete is jobban követhető, ha a másodpercenként 100 fordulatot megtevő keréken 50 fog és 50 hézag van, a tükör távolsága pedig 15 km. A fénysebesség így  $30 \text{ km} : 0,0001 \text{ mp} = 300\,000 \text{ km/mp}$ . Vízben mérve ennek  $3/4$ -ét, üvegben mérve  $2/3$ -át találták. A fénysebesség fontos szerepe: tapasztalat szerint a létező legnagyobb sebesség.

26. Dolgoztatás.

levő  $A_0$  és  $B_0$  pontokba. Ezután a felső sugár a geometriai optika szabálya szerint haladva  $A_1-F$  utat, az alsó sugár a  $B_1-F$  utat teszi meg. Megrajzoljuk a vezérvonalig terjedő  $A_1-M$  és  $B_1-N$  távolságokat. A parabola tulajdonságánál fogva  $A_1M = A_1F$  és  $B_1N = B_1F$ . A felső fénysugár teljes útja a fókusz síkjától  $F$ -ig  $A_0A_1 + A_1F = A_0A_1 + A_1M = A_0M$ , az alsóé  $B_0B_1 + B_1F = B_0B_1 + B_1N = B_0N$ . Azonban  $A_0M = B_0N = KF$ . Eszerint a két fénysugár útja a fókuszig egyenlő hosszú. Tehát ha  $AB$ -be egyenlő fázissal érkeztek, akkor a fókuszba is így érkeznek és erősítik egymást. Minden pont, például a tükör  $A_1$  és  $B_1$  pontjai valóban újabb hullámok kiinduló pontjai, de ezek máshová mint  $F$ -be érkezve különböző hosszú utakat tesznek meg és interferencia folytán középértékben kioltják egymást. Tehát a hullámelméletből következően abban az irányban marad meg a fény, amelyet a fénysugarak geometriai optikája ír le.

Másik problémánk: a fénytörést is kapcsolatba kell hozni a fizikai fénytannal, és miért szerepelnek a töréstartvényben éppen a szögek sinusai? Érkezzen párhuzamos sugárnyaláb vákuumból az anyag felszínéhez (2. ábra). (A fizikai fénytann első következménye, hogy csak véges vastagságú fénysugarakról beszélhetünk.) A vákuumban a terjedési sebesség  $c$ , az anyagban az ennél kisebb  $v$ . A messziről, párhuzamos sugarakban érkező fény  $A_0B_0$ -ba ismét egyenlő fázissal jut el, valamint  $A_1B_1$ -be is. A hullámtermészet megköveteli, hogy a közegben



2. ábra

is a sugárra merőleges hullámfrontban egyszerre haladjanak a hullámok. Ez csak úgy lehetséges, ha az  $A_1A_2$  út ideje,  $A_1A_2/c$  egyenlő a  $B_1B_2$  út  $B_1B_2/v$  idejével:  $A_1A_2/c = B_1B_2/v$ . Azonban  $A_1A_2 = A_2B_1 \sin \alpha$  és  $B_1B_2 = A_2B_1 \sin \beta$ , tehát  $\sin \alpha / \sin \beta = c/v$ . Tehát a sinusok hányadosa konstans és megtudtuk, hogy a törésmutató a terjedési sebességek hányadosa.

33. A fényhullám adatai közül még nem ismerjük a rezgésszámot. Ezt a terjedési sebesség és a hullámhossz hányadosaként kapjuk meg és néhány jellemző hullámhosszú fényre vonatkozóan kiszámítjuk. További kérdésünk, hogy (a terjedési sebességen kívül) miként módosulnak a fényhullám adatai, ha közegbe megy át. Hullámhosszmérést végzünk optikai rácscsal úgy, hogy izzószálak közül az egyiket levegőn át, a másikat vízeskádön keresztül képezzük le. Ezután közösen a két fény számára optikai rácsot helyezünk el. A rácsszínképben a vízben észlelt 4 erősítésre a levegőben 3 jut, tehát a vízben a hullámhossz csak harmadrésznnyi. Mivel a kísérletek szerint a hullámhossz is ilyen arányban kisebb, következik, hogy a rezgésszám változatlan marad a közegben, tehát a hullámlzás praktikusabb adata, mint a hullámhossz.

34. A különböző terjedési sebességekkel függ össze a diszperzió jelensége. Bemutatjuk a diszperziót egyetlen törésnél és prizmánál.

35. Feladatok a diszperzióra. Spektroszkóp prizával, ahol a hullámkeverék elemzését szintén az teszi lehetővé, hogy a különböző hullámhosszú fények egymás mellé kerülnek különböző helyekre.

36. Még nem tudjuk, hogy a fényhullám a hullámlzások melyik fajtájába tartozik. A két üveglapos polarizációs kísérlettel eldöntjük, hogy tranzverzális hullámlzás, mert a terjedése körül nem viselkedik minden irányban egyformán. Ehhez azonban az szükséges, hogy a terjedési irányra merőleges, de legkülönbözőbb síkokban végbemenő rezgések közül csak egyetlen síkban fekvők maradjanak meg. Ez a poláros fény. Ezt szűri ki és ezt lehet felismerni az  $57^\circ$ -os beesési szögben tartott üveglappal.

37. A kettőtörés megfigyelése kalcitnál, a két fény megvizsgálása a már megismert  $57^\circ$ -os üveglappal. Polaroid-szűrők.

(Egyetlen kérdésre várunk még feleletet: mi hullámlzik, rezeg a fényben? Mivel elektromosságban még nem volt soron, a pontos tárgyalás csak később történhet meg. De annyit előlegezve feltétlenül meg kell mondanunk, hogy a fényben elektromos és mágneses erők végeznek rezgést.)

38. A látható színképen kívüli fények. Infravörös sugárzás, követi a visszaverődés és törés törvényét. Ultrabolya sugárzás, felismerhető például fluoreszkálással (a fénycsőben is

használják). A közönséges fluoreszkáló porbevonatos higanygőzlámpa buráját eltávolítva jó kvarclámpánk marad.

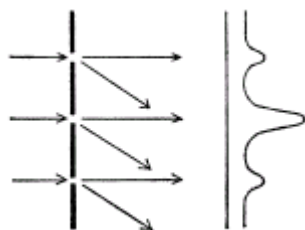
39. A színeképek fajai. A gázok vonalas színeképe (higanygőzlámpa, hidrogén Balmer-sorozata). Izzósál folytonos színeképe. Az elnyelési színekép: izzósál folytonos színeképét bíbor színszűrőn átvezetve csak a két széle marad meg. Kirchhoff törvényét a gőzök elnyelésére vonatkozóan legkönnyebben gázlángok árnyékával mutathatjuk meg. Konyhasóval nátriumos sárgára festett gázlágnak fehér vagy más színű fényben nincs árnyéka, csak egy másik nátriumfény erősebb gázláng vagy nátrium-spektrállámpa útjába állítva. A talliummal zöldre festett láng csak a tallium-spektrállámpa fényében ad árnyékot. Kézi spektroszkópban direkt vagy szórt napfényben jól látszanak a Fraunhofer-vonalak.

40. A fénysugárban energia terjed, bármilyen hullámhosszú, rezgésszámú legyen is. Elnyelődve végső fokon az energia meleget ad, esetleg másfajta energiát is fluoreszkálás, fotocella esetében stb. Tanulmányozzuk a fénysugárban terjedő energiát. Piros, sárga, zöld és kék színű üveglemezekből álló sorozat alá fotocélokra használt brómezüst nagyítópapírt teszünk, és ezt a színes üvegeken át egy-két másodpercig rendes fénnel megvilágítjuk. Előhívás után észleljük, hogy csak a kék üveg alatt keletkezett erős nyom, a piros, sárga alatt semmi. Körülbelül ugyanannyi energia érkezett a brómezüstpapír minden részére, de különböző hullámhosszakon, és a hatás más volt. Ennek oka: a nagyobb rezgésszámú kék fény energiája nagyobb, a kisebb rezgésszámú piros fény energiája kisebb adagokban van együtt a fénysugárban. A fénysugár energiája csak ezen energiaadagok egész számú többszöröseként sugározható ki és nyelhető el. A fénykvantum, más néven foton energiája arányos a rezgésszámmal:  $E = hn$ . Ha  $E$  jouleban,  $n$   $\text{sec}^{-1}$ -ben van megadva, akkor a tapasztalat szerint  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ . A fotonok energiája a rezgésszámtól függő érték, igen pontosan meg van határozva adott rezgésszám mellett, de térbeli kiterjedésükről nem érdemes beszélni.

41. A fénysugárban haladó energia pontosan meghatározott adagokban, fotonokban kerül kibocsátásra és nyelődik el. A foton olyan részecske, amelynek a rezgésszámmal arányban álló, pontosan meghatározott energiája van. Számos kísérlet mutatta, hogy a fotonnak pontosan meghatározott tehetetlensége, vagyis tömege is van. Ha a foton elnyelődik, akkor meglöki a felfogó ernyőt (fénynyomás). A tömeg meghatározására például elektronnal való ütközése volt alkalmas. Az  $1,23 \cdot 10^{20} \text{ sec}^{-1}$  rezgésszámú,  $0,0244 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$  hullámhosszú röntgenfényről megállapították, hogy a  $9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$  tömegű elektronnak ütközve az lódul tovább, a foton pedig megáll, vagyis a fény megszűnik. A rugalmas ütközés szabálya szerint ez azt jelenti, hogy a foton tömege egyezik az ütközés előtti elektrontömeggel. Képletben kifejezve  $hn = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 1,23 \cdot 10^{20} = 8,1 \cdot 10^{-14} \text{ joule}$  energiájú fotonnak a tömege  $hn/c^2 = 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ . Vagyis  $E$  energiájú fotonnak  $E/c^2$  tömege van. A fénykibocsátáskor a fényforrás a kisugárzott fotonokkal nemcsak  $E$  energiát, hanem  $E/c^2$  tömeget is veszít, elnyeléskor pedig, amikor az elnyelő lemez az  $E$  energiától melegszik, egyszersmind megkapja az elnyelt fotonok  $E/c^2$  tömegét. Az energia és tömeg együtt jönnek és mennek, szigorúan arányos mennyiségekben. Tulajdonképpen ugyanazt a dolgot mérjük meg nyilvánulása szerint két különböző módon és formában: egyszer mint energiát, egyszer mint tömeget. (Ezek az ismeretek igen megkönnyítik majd az atomfizikában a tömegdefektus tárgyalását.)

42. A fotonok megismerése első pillanatban nehézséget okoz azért, mert a fényről megállapítottuk, hogy hullámzás, elektromos és mágneses erők tranzverzális hullámzása. Hasonló a helyzet, mint amikor a geometriai fénytán fénysugarának fogalmát kellett összeegyeztetni a Huygens-féle felfogással. A foton és a fényhullám viszonyának megértése

céljából tekintsünk egy 1 mikron rácsállandójú rácsot, amelyre 0,5 mikron hullámhosszúságú, zöld fényt bocsátunk (3. ábra). Az első erősítést a  $\lambda = d \sin \alpha$  rácsszabály szerint 30°-os irányban észleljük, ahogy a hullámoptika tanítja. Most képzeljük el ezt a jelenséget úgy, hogy



3. ábra

az optikai rácson keresztül dobunk egyetlen fotont. Ebben az esetben az a helyzet, hogy a foton hollétéről, pályájáról semmit sem lehet megállapítani. Valahol eléri az ernyőt, de nem lehet megállapítani, hogy szükségképp hol. Ha azonban igen nagy számban érkeznek a fotonok, akkor valószínűségi alapon azt lehet mondani, hogy nagyon sok fog a sugár folytatásában az ernyőre kerülni, elég sok a 30°-os erősítési irányban stb. Tehát a fénnel kapcsolatban említett  $\lambda = 0,5$  mikronos hullámhossz arra való, hogy segítségével megtaláljuk nagyszámú foton esetében annak a valószínűségét, hogy merrefelé érik el sokan az ernyőt. A fényhullám néven ismert jelenség a fotonok észlelésének valószínűségét megadó matematikai eljárás. Így szól a természeti törvény.

Igen nagy horderejű volt az a felfedezés, hogy ez a törvény nemcsak fotonokra, hanem minden részecskére érvényes. Bocsássunk az előbbi 1 mikronos rácson 1,77 km/sec sebességű elektronokat keresztül. Egyetlen elektron sorsáról semmit sem lehet mondani. Sok elektron esetében a természeti törvény következőképp alkalmazandó. A  $\lambda = h/mv$  képlettel számítsunk ki egy hullámhosszat, mint matematikai jellegű segédfogalmat. Vizsgáljuk meg, hogy egy ilyen hullámhosszú hullámmozgás az adott optikai rácson milyen interferenciaképet adna. Azt fogjuk tapasztalni, hogy sok elektron repül egyenesen tovább, de sok repül oldalt 30°-os szögben az ernyőre stb., vagyis a felfogott elektronok eloszlása olyan lesz, mint egy optikai rácsszínkép. A kísérlet pontosan ezt az eredményt adja.

Optikában könnyű interferenciát mutatni, mert vannak monokromatikus fényforrásaink. Ha repülő elektronokkal, molekulákkal akarunk ilyen interferenciajelenséget észlelni, akkor szigorúan gondoskodni kell a részecskék egyező sebességéről, különben a „vonalak” összefolynak. Azonkívül észlelhető méretű hullámhosszat csak kis tömegű részecskéknél remélhetünk  $h$  kicsinysége miatt.

Végeredményben az anyagra jellemző, hogy tehetetlensége van és gravitál. Kétféle fajtája van. Az elsőfajú csak a fénysebességnél lassabban mozoghat, például elektron, proton, molekula, kugligolyó stb. A másodfajú csak fénysebességgel mozoghat; ha ebben akadályozzuk egy felfogó ernyővel, akkor átalakul elsőfajú anyaggá; tömegét, energiáját egy rezgésszám-jellegű adat adja meg, ilyen a foton, (és a neutrínó).

Befejezésül álljon itt néhány olyan feladat, amely a lehetőséghez képest tanulói kísérletre vagy szakköri foglalkozásra alkalmas:

- Fénysugár eltolódása planparalel lemeznél.
- Törésmutató mérése kis törőszögű prizmaival.
- Lencserendszer vizsgálata.
- Hullámhosszak pontosabb mérése finom ráccsal.
- Spektroszkóp skálájának hitelesítése ezekkel a fényekkel.
- A Balmer-sorozat hullámhosszainak mérése.
- A fényképezés fotokémiája.
- Színkeverés.
- Színes fényképezés elmélete és gyakorlata.