

UFOčebnica: Svetlo a optika

Milí riešitelia!

V nasledujúcom texte sa dozviete, čo to je vlastne svetlo, ako sa v minulosti odhaľovali jeho prekvapivé vlastnosti a nakoniec ako sa svetlo správa pri prechode sklenenými šošovkami a rôznymi inými materiálmi. Veríme, že aj vy *uvidíte*, aká super je optika.

Svetlo v dobách minulých

To, že svetlo je nejaké *elektromagnetické vlnenie*, zistili fyzici až na konci 19. storočia. Konkrétne sa o to zaslúžil pán Maxwell, ktorý v roku 1862 spísal základné rovnice elektromagnetizmu. Po krátkom čase si ale vedci všimli, že úpravou týchto rovníc dostávame rovnice popisujúce svetlo – teda niečo, čo s elektrinou a magnetizmom nemalo dovtedy absolútne nič spoločné. To, že optika a elektrina a magnetizmus sú vlastne prejav toho istého efektu sa dodnes pokladá za jeden z najúžasnejších fyzikálnych objavov.

Podme ale pekne po poriadku a elektromagnetizmus nechajme bokom, pretože história objavovania svetla siaha oveľa viac do minulosti. Lom svetla skúmali už grécki filozofi Platón a Aristoteles. Takzvaný *zákon lomu*, o ktorom si povieme v ďalších kapitolách, bol jasný už Euklidovi a Ptolemaiovi.

Poznatky o lome svetla sa zvyšovali spoli s presnosťou výroby šošoviek a iných optických prvkov. Úsilie stredovekých vedcov vyústilo v roku 1608, kedy holandský optik Hans Lipperschey zostrojil prvý teleskop. No trvalo až celé dva roky, kým sa o jeho objave dozvedel Galileo Galilei a vykonal s ním úžasné astronomické objavy.

V roku 1621 Willebrord Snell správne popísal zákon lomu svetla, ktorému sa tiež hovorí Snellov zákon a spolu s Christianom Hyugensom prišli na to, že na svetlo sa dá pozeráť ako na súbor svetelných lúčov, ktoré sa lámu podľa istých pravidiel. Všetky tieto pravidlá následne zhrnul Pierre Fermat do jediného: „*Svetlo sa vždy pohybuje tak, aby z jedného bodu do druhého prešlo za čo najmenší čas.*“

Tu sa však sranda nekončí, a behom niekoľkých rokov ľudia objavili ohyb svetla (odborne difrakciu) a interferenciu, čo sú javy, ktoré vznikajú pri prechode svetla veľmi malými otvormi. Tieto dva javy sú zodpovedné napríklad aj za to, že mydlová bublina má jemný dúhový nádych.

Nakoniec, v 18. storočí sa vedci pokúšali zmerať, ako rýchlo sa vlastne svetlo pohybuje. A zistili, že naozaj rýchlo – ako prvý rýchlosť svetla odmeral Ole Rømer v roku 1676. Merania sa časom spresňovali, až nakoniec sme zistili, že svetlo sa vo vákuu pohybuje rýchlosťou približne $c_0 = 300\,000$ km/s.

Zákony optiky: odraz od zrkadla

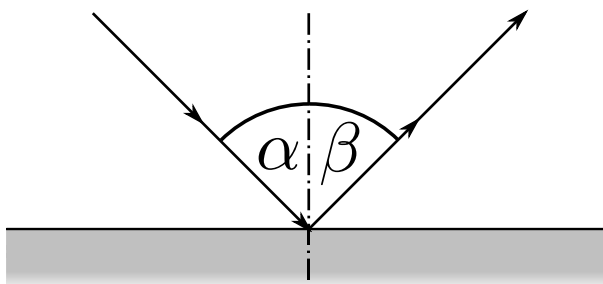
Seminár podporujú:



iuVenta

Svetelné lúče sa v našom svete šíria na základe fyzikálnych zákonov. Jedným z nich je *zákon odrazu*. Určite ho všetci poznáte: svetlo sa od zrkadla odráža pod rovnakým uhlom, ako naň dopadá. Jasné ako facka.

Skúsme ale túto poučku popísať trochu fyzikálnejšie. V optike používame označenie pre *uhol dopadu* ako pre uhol, ktorý zvierajú svetelný lúč s takzvanou *optickou osou* – myslenou čiarou, ktorá je kolmá na povrch zrkadla. Na obrázku 1 je tento uhol označený α . Druhý uhol na obrázku, β , zasa nazývame uhlom odrazu.



Obr. 1: Odraz svetla na zrkadle

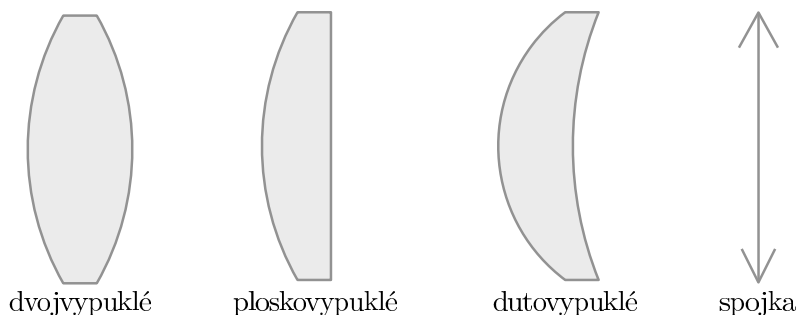
Keď sme si všetko pekne pomenovali, tak zákon odrazu môžeme napísať formou jednoduchšej rovnice

$$\alpha = \beta.$$

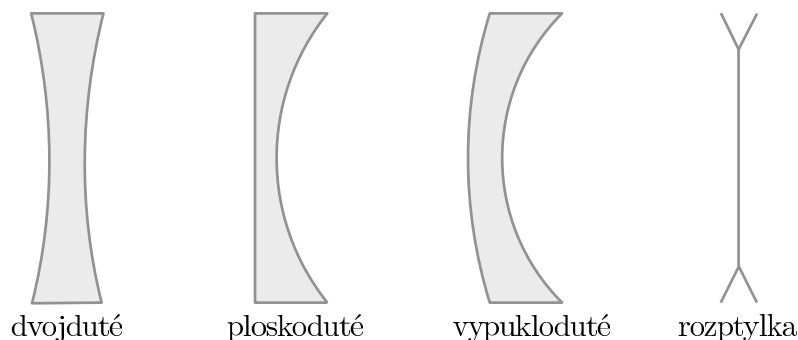
Zákony optiky: zobrazovanie šošovkami

Zamýšľali ste sa už niekedy nad tým, čo sú to šošovky a na čo nám vlastne slúžia? Môžeme ich definovať ako super vecičku, ktorá slúži na ovplyvnenie šírenia svetla: na povrchu šošovky sa totižto svetlo láme – o tom ale v ďalšej kapitole.

Pred tým, ako začneme, si povedzme jednu dôležitú informáciu. A to, že šošovky delíme na dva základné druhy: spojné šošovky (spojky), pozri obrázok 2 a rozpojné šošovky (rozptylky), pozri obrázok 3.



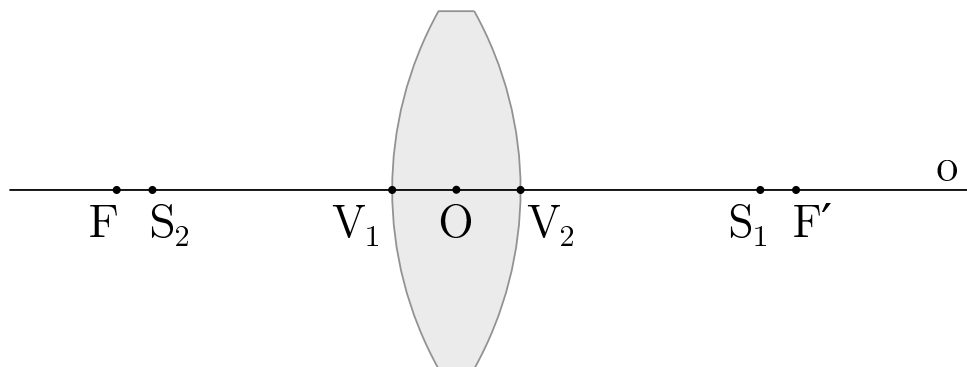
Obr. 2: Rôzne spojky (úplne vpravo je nakreslená všeobecná značka pre spojku)



Obr. 3: Rôzne rozptylky (úplne vpravo je nakreslená všeobecná značka pre rozptylky)

Základný rozdiel medzi nimi je, že spojky sú najširšie v strede a smerom k okrajom sa zužujú, pričom u rozptyliek je to presne naopak.

Teraz zapojíme svoju predstavivosť a rozdelíme si povrch šošovky na dve časti. Obe tvoria malú časť z povrchu nejakej gule. Obe gule majú samozrejme aj svoj stred (označme ich S_1 a S_2). Keď spojíme priamkou tieto dva stredu, dostaneme *optickú os*, ktorú budeme označovať písmenom o . Priesečníky, respektíve body, kde sa pretínajú časti povrchov šošoviek s optickou osou, označme V_1 a V_2 . Odborne sa nazývajú vrcholy šošovky, a vzdialenosť medzi nimi hrúbka šošovky. Nás však zaujíma len to, že stred úsečky V_1V_2 je *optický stred sústavy*, ktorý označujeme O . Celá situácia je zobrazená na obrázku 4.



Obr. 4: Dôležité body v geometrii šošovky

Najdôležitejším bodom pri zobrazovaní šošovkou je však *ohnisko*, ktoré je na obrázku 4 označené F . Vzdialenosť $|FO|$ sa nazýva ohnisková vzdialenosť f . Teraz už stačí vedieť len to, že priestor, z ktorého svetlo do šošovky vstupuje, sa nazýva *predmetový* priestor a priestor, do ktorého vystupuje svetlo po prechode šošovkou sa nazýva *obrazový* priestor. Rovnako aj ohnisko je predmetové – F a obrazové – F' .

A už sa konečne dostávame k vysvetleniu čarovných vlastností šošoviek, teda sa dozvieme, ako vlastne šošovky zobrazujú. Na to samozrejme potrebujeme vedieť, ako sa správa svetlo prechádzajúce šošovkou.

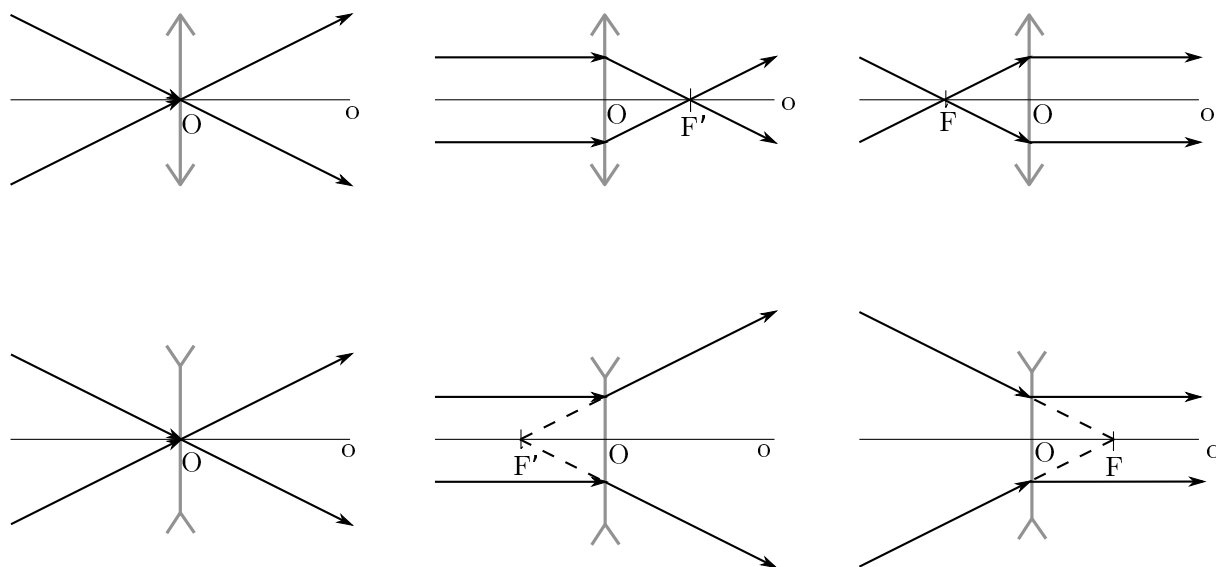
Je to veľmi jednoduché. Existujú totiž tri základné pravidlá pre tri špeciálne lúče:

1. lúče idúce cez stred (O) pokračujú v pôvodnom smere, ako by tam šošovka ani nebola;

2. lúče idúce *rovnobežne* s optickou osou sa lámu do ohniska;

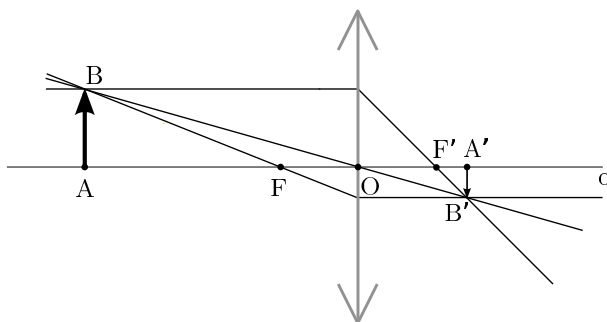
3. lúče idúce cez ohnisko sa lámu rovnobežne s optickou osou.

Najjednoduchšie je ale pozrieť sa na obrázok 5, v ktorom je krásne vidieť, ako prechádzajú tieto špeciálne lúče spojku a rozptylkou. Všimnite si, že v prípade rozptylky sa rovnobežné lúče lámu tak, ako keby vychádzali z ohniska, a naopak, na rovnobežné sa lámu tie lúče, ktoré ako keby do ohniska vchádzali.



Obr. 5: Smery rôznych lúčov po prechode šošovkami

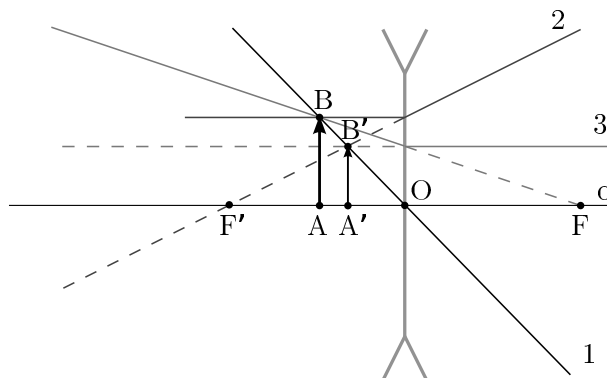
Pravidlá si ukážme na konkrétnych príkladoch. Zoberme si napríklad spojku. Ešte pred ohnisko si umiestnime úsečku AB. Následne z bodu, ktorý chceme cez spojku zobrazíť, vyšleme všetky tri špeciálne lúče.¹ V bode, kde sa tieto lúče stretnú, sa nachádza obraz príslušného bodu – pozri obrázok 6.



Obr. 6: Zobrazenie úsečky spojku

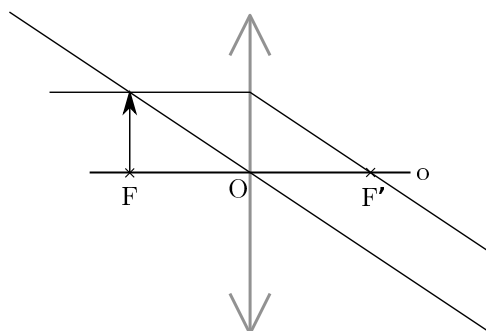
To iste môžeme ukázať aj pre rozptylku. Tentokrát však úsečku umiestnime pred ohnisko – pozri obrázok 7.

¹Stačia aj dva, ale istota je istota.



Obr. 7: Zobrazovanie rozptylkou

Ako ste si už určite niekedy všimli, keď sa na predmet pozeráte cez spojku alebo rozptylkou, môže sa vám zobrazíť buď vzpriamene, alebo dole hlavou, môže taktiež zmeniť veľkosť, ale, samozrejme, nemusí. Zvláštny prípad ale nastáva, keď predmet umiestnime presne do ohniska spojky, pozri obrázok 8. Vtedy sa lúče nepretnú, ale budú pokračovať ako rovnobežky až do nekonečna – preto aj hovoríme, že obraz sa nachádza v nekonečne. Ale nie je to nič čudné – veď na nekonečno vedľa zaostrí ľudské oči a aj fotoaparáty. Jednoducho tieto rovnobežné lúče zlomia naspäť do ohniska.



Obr. 8: Obraz sa nachádza v nekonečne

Zákony optiky: Snellov zákon

V úvode sme si povedali, že rýchlosť svetla $300\,000\text{ km/s}$ platí pre vákuum. V iných prostrediach (vzduch, voda, sklo) sa svetlo pohybuje *pomalšie*. To je spôsobené elektrickými a magnetickými vlastnosťami týchto prostredí. V optike sa tieto vlastnosti prejavujú na hodnote zaujímavej fyzikálnej veličiny, ktorá sa volá *index lomu*. Index lomu označujeme písmenom n a vyjadruje, koľkokrát je svetlo v nejakej látke pomalšie ako vo vákuu. Ak túto rýchlosť svetla v látke s indexom lomu označíme ako v , potom platí rovnica

$$v = \frac{c_0}{n}.$$

Záhľadné veci sa dejú vtedy, keď svetelný lúč prechádza medzi dvomi prostrediami s rôznymi indexmi lomu (hovoríme tomu aj opticky rôzne husté prostredia). Vtedy dôjde k javu, ktorý popisuje práve Snellov zákon, nazývanému *lom svetla*.

Určite ste sa niekedy pozerali na akvárium s rybičkami. Ak by ste sa pozreli na akvárium šikmo, mohli ste si všimnúť, že pod niektorými uhlami vidíte takpovediac „za roh“. Svetlo sa totižto zlomilo tak, že ste mohli vidieť aj veci, ktoré sú priamo za susednou stenou. S týmto faktom prichádza aj jav, že sa všetky veci javia v akváriu stenčené.

Svetlo v akváriu sa láme najskôr na rozhraní voda-sklo a potom ešte na rozhraní sklo-vzduch. Index lomu vody je 1,33, index skla je typicky 1,5 a index vzduchu je prakticky rovný 1.²

Rozdiely v rýchlosti svetla majú za následok to, že svetlo sa nebude cez rozhrania pohybovať vždy priamo, ale na rozhraní náhle zmení svoj smer, pozri obrázok. V ňom sme si označili dva dôležité uhly: uhol dopadu α a nový uhol lomu β . Ďalej sme si označili index lomu prostredia, v ktorom sa svetlo pohybuje pred zlomením, ako n_1 a index lomu, v ktorom sa svetlo pohybuje po lome, ako n_2 . Po poctivom označení môžeme napísať slúbený Snellov zákon

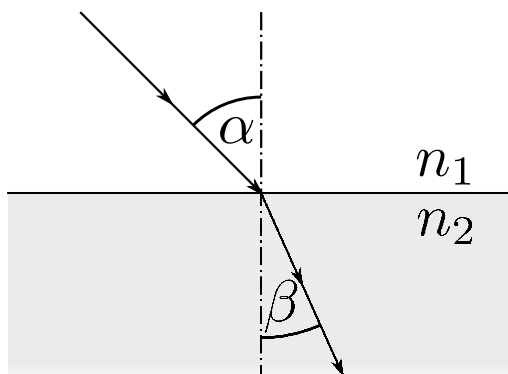
$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta.$$

Skratka $\sin$ v poslednej rovnici značí sínus uhla. Ak neviete, čo to sínus je, prečítajte si predošlý diel UFOčebnice.

Teraz si z poslednej rovnice vyjadríme $\sin \beta$:

$$\sin \beta = \frac{n_1}{n_2} \sin \alpha.$$

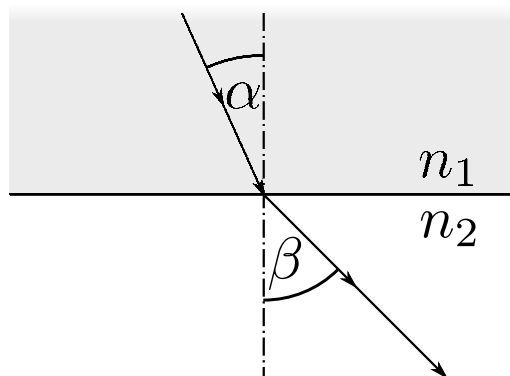
Dostali sme teda vzťah pre sínus uhla, pod ktorým bude svetlo rozhranie opúšťať. Ak bude platiť $n_1 < n_2$, tak musí tiež platiť $\sin \beta < \sin \alpha$. Na kalkulačkách si môžete ľahko overiť, že pre uhly menšie ako 90° potom musí platiť aj, že $\beta < \alpha$. Uhol lomu je teda menší, ako uhol dopadu. Tomuto lomu hovoríme *lom ku kolmici*.



Obr. 9: Lom svetla ku kolmici

Naopak, ak bude platiť $n_1 > n_2$, obráti sa aj znamienko druhej nerovnosti na $\sin \beta > \sin \alpha$. Preto bude platiť aj $\beta > \alpha$, teda uhol lomu bude väčší ako uhol dopadu a lom budeme nazývať *lom od kolmice*.

²Svetlo sa vo vzduchu pohybuje preto takmer rovnako rýchlo, ako vo vákuu.



Obr. 10: Lom svetla od kolmice

Tu ale sranda iba začína. Čo, ak budeme zákerní a uhol α budeme postupne zvyšovať (napríklad posúvaním zdroja svetla)? V prvom prípade sa nebude diať nič tragické – jednoducho bude rásť aj uhol lomu, ale stále bude platiť, že je menší ako uhol dopadu.

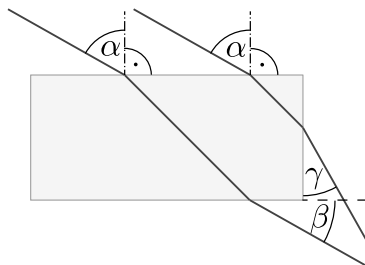
V druhom prípade je situácia dramatickejšia, pretože postupne dospejeme k takému uhlu α_m , pre ktorý zo Snellovho zákona vyjde $\sin \beta = 1$. Takýto sínus má len uhol $\beta = 90^\circ$, takže lomené svetlo sa bude pohybovať pozdĺž rozhrania dvoch materiálov a o nejakom skutočnom lome nemôže byť ani reč. Pre väčšie uhly dokonca ani nenájdeme taký uhol β , aby spĺňal Snellov zákon. Vtedy sa všetko svetlo odrazí od rozhrania ako od zrkadla (a uhol odrazu bude rovnaký, ako uhol dopadu).

Práve toto je dôvod, prečo z niektorých smerov nevidíme objekty za akváriom naplneným vodou. Jednoducho lúč, ktorý by mal vchádzať do našich očí, nespĺňa Snellov zákon.

Ak ste sa doteraz optiky báli, ako sami vidíte, nebol na to dôvod. Svetlo sa vždy bude správať podľa zopár jednoduchých pravidiel, ktoré majú ale efektné dôsledky.

Príklad

Na pravouhlý hranol si Denda rada posvieti laserovým ukazovátkom. Jej oblúbený hranol má obdĺžnikový prierez a index lomu $n = 1,5$. Naposledy si naň zasvietila pod uhlom $\alpha = 35^\circ$:



Obr. 11: Lom dvoch svetelných lúčov na hranole

Podľa toho, kam sietila, lúč vyšiel z hranola buď cez stenu protilahlú k tej, cez ktorú vchádzal, alebo cez stenu susednú s tou, cez ktorú vchádzal. Aký uhol β zvierá lúč s protilahlou stenou hranola, ktorú opúšťa? Aká je veľkosť uhla γ , keď lúč vychádza cez susednú stenu?

Riešenie

Na vyriešenie tejto úlohy nám určite veľmi dobre padla vhod UFOčebnica. Konkrétne nám veľmi pomohla časť, kde sme sa stretli so Snellovým zákonom. Tam sme sa dozvedeli taký vzorček, ktorý nám hovoril, že

$$\sin \gamma = \frac{n_1}{n_2} \sin \alpha .$$

Podme sa teda pozrieť, aký je výsledný uhol β . Keďže index vzduchu $n_1 = 1$, tak nám ostane, že

$$\sin \gamma = \frac{1}{n_2} \sin \alpha .$$

Teraz máme lúč v skle, tam chvíľku pobudne a už ide zo skla von do vzduchu. Tak sa na to pozrime s naším vzorčekom

$$\sin \beta = \frac{n_1}{n_2} \sin \gamma .$$

Teraz vidíme, že n_2 – index lomu vzduchu je zas rovný 1. Vzorček po upravení je:

$$\sin \beta = n_1 \sin \gamma .$$

Teraz za $\sin \gamma$ dosadíme náš výsledok:

$$\sin \beta = n_1 \left(\frac{1}{n_2} \sin \alpha \right) .$$

Po úpravách nám vyšlo, že $\beta = \alpha$. Čo to znamená? Že lúč, ktorý vychádza zo sklenenej tabule vychádza pod rovnakým uhlom, ako vchádzal. Len nesmieme zabudnúť, že uhol β je ku kolmici, to znamená, že hľadaný uhol je $90^\circ - \beta$, teda β je rovná 55° .

Teraz sa pozrime na druhú časť úlohy a to uhol γ , ktorý máme vypočítať. Prvý vzorček

$$\begin{aligned} \sin \beta &= \frac{1}{n_2} \sin \alpha , \\ \beta &= \arcsin \left(\frac{1}{n_2} \sin \alpha \right) , \\ \beta &= 22.5^\circ \end{aligned}$$

máme správne (vstup do skla). Zo skla nám lúč vychádza pod uhlom $90^\circ - \beta$. Potom platí, že

$$\sin \gamma = n_1 \sin(90^\circ - \beta)$$

Potom $\sin \gamma$ po vyjadrení je:

$$\begin{aligned} \sin \gamma &= \frac{n_2}{n_1} \sin(90^\circ - 22.5^\circ) \\ \sin \gamma &= 1.38 \end{aligned}$$

Keď však nahodíme takúto vec do kalkulačky, tak nám povie dačo na zmysel Math error. Čo to znamená? To znamená presne to, čo sme sa dočítali v UFOčebnici, že pre $\sin \gamma \geq 1$ nastáva takzvaný úplný odraz, kedy nám svetelný lúč vôbec neprejde cez sklo do vzduchu, ale odrazí sa naspäť. To je zatiaľ všetko z optiky, nabudúce si povieme znovu niečo viacej :)