

Rozhledy matematicko-fyzikální

Ivan Turek

Niekoľko námetov na spestrenie a spresnenie vyučovania fyziky

Rozhledy matematicko-fyzikální, Vol. 101 (2026), No. 2, 46–64

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/153694>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2026

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ*:
The Czech Digital Mathematics Library <http://dml.cz>

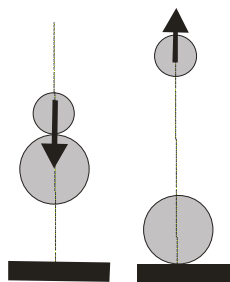
Niekoľko námetov na spestrenie a spresnenie vyučovania fyziky

Ivan Turek, Žilina, Slovensko

Tým spestrením sú (a majú byť) najmä demonštrácie. Pretože umožňujú vidieť javy, ktorým je príslušná časť učebnej látky venovaná, takže prepájajú abstrakciu slovného popisu s realitou. A to, že ... *pôsobia na všetky zmysly* zdôrazňuje, že demonštrované súvislosti (zákony) nie sú vymyslené, že sú vlastnosťou reality, prírody.

Skutočnosť, že výsledok demonštrácie sa málokedy do všetkých detailov zhoduje s teoretickým popisom predvádzaného javu, priamo nabáda na hľadanie príčin nezhody, čo umožňuje vidieť, ako je priebeh predvádzaného javu ovplyvnený okolitým prostredím, takže núti vidieť javy vo vzájomnej súvislosti.

Demonštrácie rázov



Nechajme padať dve lopty rôznych hmotností tesne za sebou tak, že „spodná“ je ťažšia. Po ich odraze môže ľahšia lopta vyletieť nad úroveň, z ktorej boli lopty spustené, a ťažšia lopta zostať nehybná na zemi.

Ak by to boli dokonale pružné lopty, tak vysvetlenie je jednoduché: Prvá lopta po odraze od zeme sa odrazí s rovnakou rýchlosťou, akú získala voľným pádom, a vzápätí sa zrazí s ľahšou loptou, ktorá sa pohybuje smerom dole rovnako veľkou rýchlosťou (lebo padali z rovnakej výšky). Vypočítať rýchlosti, ktoré lopty budú mať po zrážke, môžeme zo zákonov zachovania hybnosti a energie

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = m_1 \cdot u_1 + m_2 \cdot u_2,$$

$$\frac{1}{2} m_1 \cdot v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 \cdot u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot u_2^2,$$

kde rýchlosti pred zrážkou sú označené písmenami v , rýchlosti po zrážke písmenami u . Ako si lopty rozdelia celkovú hybnosť závisí od toho, aké

sú ich hmotnosti. To, že ťažšie teleso zmení svoju rýchlosť menej ako ľahšie teleso, asi netreba pripomínať. No a my sa zaujímame o to, pri akom pomere hmotností lôpt si energiu tej „sústavy dvoch lôpt“ odnesie ľahšia lopta (a energia ťažšej bude nulová). Číže, koľko krát musí byť tá väčšia lopta ťažšia, aby po zrážke bola jej rýchlosť rovná nule. Takže máme riešiť rovnice:

$$m_1 \cdot v_1 - m_2 \cdot v_2 = 0 + m_2 \cdot u_2,$$

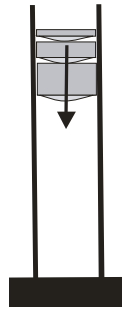
$$m_1 \cdot v_1^2 + m_2 \cdot v_2^2 = 0 + m_2 \cdot u_2^2,$$

v ktorých rýchlosť dohora považujeme za kladnú. Riešením tých rovníc dostaneme, že sa tak stane, keď $m_1 = 3m_2$. Vtedy je energia tých lôpt štyri krát väčšia ako energia tej ľahšej. Takže by tá ľahšia lopta mala vyletieť do štvornásobnej výšky. To sa však pri takom pokuse ťažko odmeria, pretože je ťažké spustiť lopty tak, aby sa ľahšia lopta odrazila rovno dohora (aby zrážka bola „čelná“).

Preto sme urobili „zvislú rampu“, v ktorej sme spúšťali valcovité telieska opatrené gumovými „nárazníkmi“. Navyše nám tá rampa umožní spúšťať tri telieska (aký má byť pomer hmotnosti druhého a tretieho telieska, sa vypočíta podobne, ako sme uviedli vyššie, ale s tým rozdielom, že tretie teliesko sa zráža s druhým telieskom, ktorého rýchlosť je väčšia ako tretieho telieska).

Avizované „spravenie“: Na prvý pohľad môžete byť porovnaním pokusu a výpočtu sklamaní – teliesko vyletí do menšej výšky, než akú sme vypočítali. Nebolo to chybou výpočtu, ani chybou zákona zachovania energie. Chybou bolo predpokladať, že sa zachová súčet kinetickej a potenciálnej energie ($\frac{1}{2}mv^2 + mgh$). Pretože časť tejto mechanickej energie sa pri deformácii „pružných nárazníkov“ (a možno aj trením v rampe a odporom vzduchu) zmení na teplo. (Napriek tomu to tretie teliesko vyletí až po strop i pri „rampe“ dlhej iba pol metra.)

To, že sme „pružnosť“ teliesok „zvalili“ na nárazníky a ich hmotnosť sme pripísali samotným telieskam, pomáha predstaviť si, ako rázy fungujú. V priebehu dopadu prvého telieska stláča teliesko jeho „nárazník“ akousi silou. Ale zároveň (zákon akcie a reakcie) nárazník pôsobí rovnakou silou na teliesko a tým ho spomaľuje. V okamihu, keď teliesko zastalo, je nárazník najviac stlačený a na teliesko pôsobí najväčšou silou, urýchľuje ho do opačného smeru (zákon sily), takže tomu teliesku „odo-



vzdá“ energiu, ktorá sa „použila“ na stlačenie nárazníka. Rovnako sa odohráva odovzdávanie hybnosti (a energie) premenou kinetickej energie na deformačnú energiu medzi ostatnými telieskami.

Tie premeny kinetickej a deformačnej („potenciálnej“) energie sú mechanizmom aj pri zrážkach teliesok „bez nárazníkov“. Pretože všetky pevné látky sú pružné, takže sa v nich deje to, čo sme popísali pomocou pružných nárazníkov.¹⁾

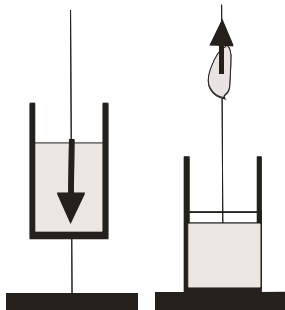
Ešte je vhodné upozorniť, že v tých rovniciach nevystupuje čas. To môže budiť dojem, že ten „odraz“ sa deje okamžite. Nie je to tak – stláčanie nárazníkov predsa nejakú chvíľu trvá. Čas v rovniciach nevystupuje preto, lebo sme sa „matematiky“ opýtali na *výsledok* zrážok (aká bude rýchlosť *po* zrážke) a nie na *proces* zrážky.

Podobné odovzdávanie hybnosti medzi časťami prostredia sa odohráva i v kvapalinách. Ilustruje to demonštrácia dopadu nádoby s kvapalinou. Ak nádoba dopadne s dostatočnou rýchlosťou, tak časť tej kvapaliny sa „oddeli“ a vyletí z nádoby.

Ale ako kvapalina „vie“, kde sa má rozdeliť? Samozrejme nevie, to určujú zákony zachovania hybnosti a energie a tlaková vlna, ktorá sa vyvolá zastavením kvapaliny pri dne nádoby. Po dopade nádoby tlak v tej vlne narastá, podobne ako narastá rýchlosť teliesok po dopade na dno rampy. A v mieste, v ktorom je rozdiel tlakov pripadajúci na vzdialenosť molekúl väčší, ako sú priťažlivé sily medzi molekulami (kapilárne sily), tam sa kvapalina rozdelí. Takže rázy nám čosi môžu povedať i o kvapalinách. A nie len o kvapalinách.²⁾

Na výpočet toho, aká bude tlaková vlna, už treba vedieť vyššiu matematiku, než akú sme použili pri loptách. A aj tak sa kvapalina rozdelí presne tam, kde to „matematika vypočíta“. Ako keby kvapalina (príroda) „rešpektovala“ matematiku. Ale je to naopak – matematika rešpektuje prírodu!

Matematika a fyzika sú vedy „odpozorované“ od prírody. Na fyzike to priamo vidieť. Napríklad: Galileo Galilei odpozoroval, že telesá padajú



¹⁾ Domnievame sa, že takýto „urozprávaný výklad“ je dôležitý. Pretože fyzika nie je (len) o rovniciach. Fyzika je hlavne o procesoch, o dejoch.

²⁾ Tu nám „rázy“ povedali, že Pascalov zákon (že prírastok tlaku v kvapaline spôsobený vonkajšou silou je všade rovnaký) v obecnosti neplatí. Platí iba v „ustálenom stave“ (keď sa nemenia vzájomné vzdialenosti elementov kvapaliny).

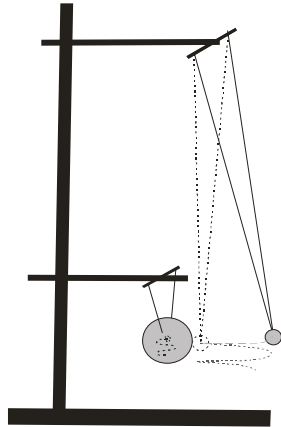
s konštantným zrýchlením, ktoré je vyvolané silou, ktorou na tie telesá pôsobí zemská príťažlivosť. A potom Izák Newton prišiel na to, že to, čo Galileo odporoval, to je zvláštny prípad obecného tvrdenia – že každé zrýchlenie je vyvolané silou, ktorá na teleso pôsobí.

A tak to je so všetkými fyzikálnymi zákonmi. A to, že tie odporované pravidlá (zákony) sa dajú vyjadriť matematikou, to je vlastnosť prírody. A základy tej matematiky (logika) sa do „myslenia“ zabudovali vtedy, keď sa v ľuďoch vytváralo myslenie. Pretože sa vytváralo pod vplyvom toho, aký je svet. I keď si niektorí ľudia myslia, že matematika je „vymyslená veda“.

Demonštrácia rázu 2 gúľ rôznych hmotností na „V“ závesoch

„V“ závesy sú tu použité preto, aby sa gule pohybovali v jednej rovine. Závesy urobme tak, aby dĺžka závesu ťažšej gule bola štvrtina dĺžky závesu ľahšej. Pri takých dĺžkach je doba kyvu ťažšej gule polovica doby kyvu ľahšej. A zavesíme ich tak, aby sa v klude práve dotýkali.

Keď ľahšiu guľku vychýlime a necháme ju dopadnúť na ťažšiu, tak sa od nej odrazí a vráti sa do takmer takej výchylky, z akej sme ju spustili. Iba „skoro“ do tej výchylky preto, lebo pri odraze od ťažšej malú časť svojej energie odovzdá ťažšej. Do svojej maximálnej výchylky sa vráti za polovicu periódy jej kyvadlového pohybu. Za ten čas ťažšia guľka vykoná pohyb zodpovedajúci celej perióde – lebo jej perióda je polovica periódy ľahkej guľky. (Na obrázku sú tie pohyby od okamihu zrážky schematicky zakreslené).



Pri ďalšom pohybe tých guľiek sa takéto zrážky opakujú, až kým ľahšia guľka neodovzdá celú jej energiu ťažšej. A potom sa odovzdávanie energie opakuje opačným smerom, od ťažšej k ľahšej.

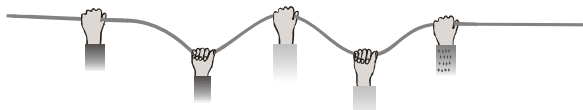
Všimnite si, že pri takých zrážkach veľká guľka nikdy nenadobudne takú rýchlosť, akú nadobúda ľahšia. A čím je rozdiel hmotností tých gúľ väčší, tým je väčší i rozdiel ich (priemerných) rýchlostí.³⁾

³⁾ Platí to nie len pre takto zavesené gule. Aj pre molekuly plynu. V plynách sa molekuly navzájom zrážajú a pri tých zrážkach sa ovplyvňujú ich rýchlosti. Keď sa jedná o zmes plynov s rôzne ťažkými molekulami (napríklad vo vzduchu), je stredná rýchlosť ľahkých molekúl väčšia ako molekúl ťažších. Tak ako pri zrážkach gúľ s rôznymi hmotnosťami.

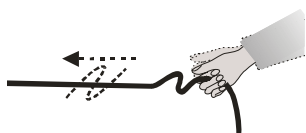
Demonštrácie vln

Vlny v jednorozmernom prostredí

Pomerne často sa pri výklade vln demonštruje vlna na pružnom lane (alebo gumenej hadici) tak, že sa jedným koncom lana „zakmitá“. Je to názorná demonštrácia, ku ktorej by som odporučil pridať „spravenie“ tým, že sa ukáže „vznik“ vlny vytvorením deformácie časti prostredia bez udelenie rýchlosti. Napríklad tak, že niekoľko študentov pridrží lano v rôznych polohách a naraz, na povel „tri, dva, jeden, *teraz*“ otvoria dlane bez toho, aby udelili lanu nejakú rýchlosť. Ak to lano uvoľnia vo všetkých miestach naraz, tak sa prostredím bude na obe strany od oblasti, v ktorej bolo lano deformované, šíriť vlna, ktorej tvar odpovedá tvaru vyvolanej deformácie.



Takáto demonštrácia by mohla byť doplnená i generáciou vlny udeľením rýchlostí elementom prostredia s nulovou výchylkou, napríklad súčasnými údermi lana na miestach odpovedajúcich tvaru predchádzajúcej demonštrácie. Demonštrácia by tak zodpovedala plnému zneniu vety o počiatočných podmienkach.



Zaujímavou je i demonštrácia odrazu vln na „pevnom“ konci pružného lana, ktoré niekto „pevne“ drží v ruke. Keď vlna dôjde na koniec lana, tou rukou trochu pohne. Znamená to, že lano pôsobilo na ruku silou a teda i tá ruka pôsobila na lano silou. A táto sila v lane vyvolá vlnu – „odrazenú vlnu“. (Na obrázku je nakreslená bodkovane.)



Ešte pôsobivejšia (a „nepochopiteľnejšia“) je demonštrácia odrazu vln na voľnom konci. Dá sa realizovať na lane, ktorého jeden koniec je zavesený na tenkej (ľahkej) nitke a lano je vodorovne. Pri takom upevnení je koniec lana (pre vlnu s výchylkou kolmo na lano vo vodorovnom smere) „voľným koncom“, pretože ten záves dovoľuje pohyb vo vodorovnej rovine.

Pre vysvetlenie vzniku takto odrazenej vlny si najprv všimnime pohyb elementu prostredia mimo konca lana. Na taký element prostredia pôsobia sily z oboch strán. Sila zo strany, z ktorej vlna prichádza, *vyvoláva* pohyb toho elementu a sila z druhej strany ten pohyb *brzdí*. Na voľnom konci prostredia táto brzdiaca sila chýba. To, že nejaká sila chýba, má rovnaký účinok, ako keby tam bola „zvonku pridaná“ rovnako veľká sila opačného smeru. Tá „pridaná“ sila by vytvorila vlnu „odrazenú“ na voľnom konci. Lebo „chýbajúca sila“ je rovnocenná tej „zvonku pridanej“ sile.

Vlny vo viacrozmernom prostredí

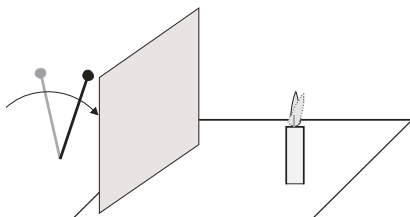
V skutočnosti každé prostredie je trojrozmerné. Ale je vo zvyku hovoriť o jednorozmernom prostredí vtedy, keď sa jedná o prostredie, ktorého hrúbka a šírka je menšia ako vlnová dĺžka vlny, ktorá sa tým prostredím šíri. A rovnako to je s „dvojrozmerným prostredím“. Je ním napríklad tenká pružná blana (bubon), alebo „povrch kvapaliny“. Dôležité je, že podstata vln v dvoj a troj rozmerných prostrediach je rovnaká ako vln jednorozmerných: „odovzdávanie“ energie susedným elementom prostredia. Rozdiel je v tom, že to odovzdávanie sa nemusí diať iba v jednom smere. A nemusí to byť vzájomná premena deformačnej a kinetickej energie. Môže to byť napríklad vzájomná premena energie elektrického poľa na energiu magnetického poľa (rádiové vlny, svetlo, röntgenové vlny, ...). Vo vlnách v plynách (akustické vlny) sa navzájom mení energia stlačenia plynu a jeho kinetická energia.

Vo vlnách na hladine kvapalín to je najzložitejšie. Tam prichádzajú do úvahy vzájomné premeny kinetickej, polohovej (potenciálnej) a povrchovej (kapilárnej) energie. Tá zložitosť sa mimo iné prejavuje tým, že rýchlosť vln na povrchu kvapalín závisia od ich vlnovej dĺžky a od ich amplitúdy. U vln s veľkou vlnovou dĺžkou a veľkou amplitúdou (vlny na mori) sú kapilárne sily zanedbateľné voči silám gravitačným (voči váhe objemu vody, ktorá sa hýbe), zatiaľ čo u vlniek v akváriu sú kapilárne sily (povrchové napätie) rozhodujúce.

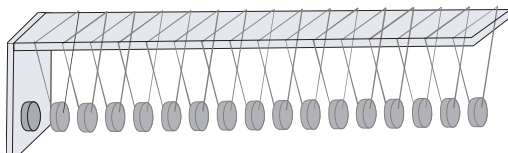
Ako to je v pevných látkach sme popísali pri popise vln v jednorozmernom prostredí (vlna v pružnom (gumenom) lane).

Vlnenie prostredia znamená, že sa v prostredí niečo mení. U mechanických vln, že sa to prostredie (tam kde je tá vlna) pohybuje. Nasledujúca demonštrácia ukazuje, že i vo vlne, ktorá sa šíri vzduchom, sa ten vzduch pohybuje: stačí pred zapálenou sviečkou vyvolať dostatočne silnú akustickú vlnu (napríklad basovým reproduktorom alebo úderom

na plechovú dosku) a o pohybe vzduchu nás presvedčí pohyb plamienka sviečky.



Šírenie sa vln nie je obmedzené iba na pružné prostredia, vodu, alebo vzduch. Môžeme „vymýšľať“ i exotické „prostredia“, v ktorých sa vlny môžu šíriť. Napríklad „prostredie“, ktoré je tvorené radom rovnakých „spriahnutých kyvadiel“, ktoré sa navzájom ovplyvňujú.



Že aj v takom „prostredí“ sa môže šíriť vlna, dokazuje ďalšia demonštrácia: vlna v rade menších feritiek na V-závesoch, rozmiestnených v rovnakých vzdialenostiach a orientovaných tak, že susedné feritky sú opačne polarizované. Ak feritku na začiatku toho radu vychýlime smerom k jej susedke, zväčší sa sila, ktorou sa odpudzujú, a to spôsobí, že prvá sa zastaví a druhá preberie jej kinetickú energiu. Odovzdávanie výchylky bude pokračovať až k poslednej zavesenej feritke – tým radom feritiek prejde „vlna“. Ten rad môže byť zakončený upevnenou feritkou, od ktorej sa vlna odrazí a prejde na začiatok radu. Tam bude síce o niečo slabšia, ale ak počiatočná výchylka bola dosť veľká uvidíme, že sa vlna od voľného konca odrazí a znovu bude tým „prostredím“ postupovať. Ale v každom prípade vlna po viacnásobnom prechode zanikne.

Avšak po zániku vlny (po zániku usporiadaného pohybu feritiek) si môžeme všimnúť, že feritky sa neprestali pohybovať. Pohybujú sa drobným „neusporiadaným“ pohybom, ktorý je akýmsi „zvyškom“ energie, ktorú sme sústave dodali rozkmitaním prvej feritky.

Hovoríme o tom preto, že presne to, čo sa dá vidieť na tom rade feritiek, sa odohráva pri šírení sa mechanickej vlny v každom materiáli. Lebo každý materiál pozostáva z prvkov (z atómov), ktoré sa navzájom nedotýkajú rovnako ako tie feritky.

A podoba medzi „vlnou“ v rade feritiek a v rade atómov je i v tom, že na pokles amplitúdy vln v oboch prípadoch má vplyv porušenie periodicity usporiadania prvkov prostredia (atómov), a i v tom, že feritky aj atómy „zánikom vlny“ energiu vlny „odovzdajú“ tomu neusporiadanému pohybu.

Tento pohyb po zániku vlny vo „feritkovom prostredí“ vidíme – v skutočnom telese ho po zániku (absorpcii) vlny môžeme cítiť ako teplo. Samozrejme vlastnými zmyslami by sme to cítili iba vtedy, keby sa absorbovala veľmi silná mechanická vlna. Ale odmerať to môžeme.

Demonštrácia interferencie vln

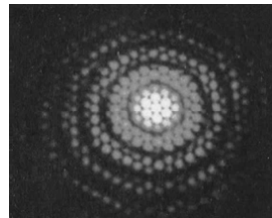
Interferencia („sčítovanie“) vln vo vzduchu (akustických vln) sa dá jednoducho urobiť dvomi reproduktormi napojenými na jeden generátor harmonického priebehu napätia. Napríklad keď pripojenie jedného z tých reproduktorov na zdroj je prepólované. (Vhodná frekvencia je niekoľko málo kHz.) Ak je vzdialenosť tých reproduktorov značne menšia, ako je vlnová dĺžka generovaného zvuku, tak zakrytím jedného reproduktoru generovaný zvuk nezoslabne, ale sa zosilní.

Zväčšením vzdialenosti tých reproduktorov na päť až desať násobok vlnovej dĺžky (vhodná vzdialenosť závisí od veľkosti miestnosti) sa vytvorí interferenčné pole, ktorého maximá a minimá zúčastnení môžu malým pohybom hlavy nájsť (pri tom je výhodné mať jedno ucho zakryté).

Pri nižších frekvenciách a dostatočnom počte poslucháčov je možné „efektne zobraziť interferenčné pole“ tým, že účastníkov požiadame premiestniť sa do miest, v ktorých je maximum interferencie.

Demonštrácia difrakcie vln

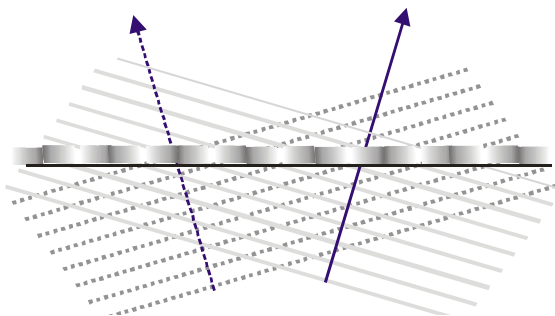
Difrakciou vln rozumieme fakt, že „stranové obmedzenie“ vln (napríklad pri prechode vlny nejakým otvorom) vyvolá to, že časť tej vlny sa odkloní od pôvodného smeru. A nemusí to byť iba malá časť vlny. Pri prechode komplikovanejšími otvormi môže dôjsť k celkom zaujímavým zmenám. Napríklad keď rovinná vlna „prejde“ cez tri malé kruhové otvory blízko seba, rozdelí sa do smerov, ktoré vytvoria rozloženie svetla uvedené na priloženom obrázku.⁴⁾



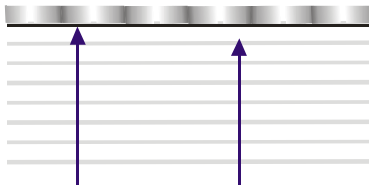
⁴⁾Tie otvory boli vytvorené tenkou ihlou v alobale. Doporučujeme ihlu pri tom medzi prstami otáčať a „vŕtať“ striedavo z oboch strán.

Ďalším príkladom difrakcie je prechod vlny (optickou) mriežkou, čiže radom medzier medzi nepriehľadnými (alebo čiastočne nepriehľadnými) prekážkami uloženými v jednej rovine. Prečo sa vlna prechodom cez mriežku „rozloží“ do rôznych smerov, je spôsobené tým, že tá prekážka zmení rozloženie výchylky prostredia (alebo rozloženie intenzity elektrického poľa, ak sa jedná o elektromagnetické vlny). A to zmenené rozloženie určuje ďalší priebeh vlnenia.

Najnázornejšie to je vidieť na prechode vlny „mriežkou“. Myslme si preto, že jednou rovinou (rovinou budúcej mriežky) prechádzajú dve rovinné vlny, ktoré sa šíria rôznymi smermi. A v tejto rovine urobme „filter“, ktorého priepustnosť je maximálna (úplná) v miestach, v ktorých tie rovinné vlny majú rovnakú fázu (ich výchylky sa sčítajú), a v miestach, kde majú opačné, je jeho priepustnosť minimálna (nulová). Tak ako je nakreslené na priloženom obrázku.

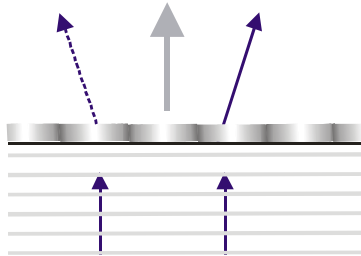


Potom, keď necháme cez takýto „filter“ prejsť rovinnú vlnu, ktorá prichádza kolmo na ten filter (na tú mriežku), tak na druhej strane mriežky bude taký vlnový stav, aký tam bol pri interferencii tých dvoch šikmých rovinných vlín. A to určuje, že prechodom kolmej vlny cez mriežku, sa musia vytvoriť také vlny, ako boli tie dve vlny, podľa ktorých sme tú mriežku vytvorili.



Keby modulácia priepustnosti tej mriežky nebola stopercentná (keby časť vlny prešla aj najčernejšími miestami, alebo sa pohlcovala i v ma-

ximálnej priepustnosti), tak mimo tých šikmých („difragovaných“) vln mriežkou prejde aj časť primárneho lúča.



Takýmto „vytvorením nových okrajových podmienok“ sa difrakcia realizuje vždy. Aj pri prechode cez jednotlivé „diery“ v tienitku. Len nie vždy sa to dá tak jednoducho nakresliť a vysvetliť. Ale podstata je tá istá.

Ešte dve pripomienky: Uhol odklonu difragovaných lúčov závisí od pomeru vlnovej dĺžky tých vln a vzdialenosti tých „prekážok“ (od mriežkovej konštanty) či veľkosti otvorov, ktorými vlna prechádza. Čím je vlnová dĺžka väčšia a otvory menšie, tým viac sa tie lúče odklonia od pôvodného smeru. Vďaka tomu sa optické mriežky používajú na analýzu „farebného“ zloženia svetelných lúčov. A druhá pripomienka, že k ohybu (difrakcii) dochádza pri všetkých vlnách, nie len u optických vln.

Demonštrácie rekonštrukcie vln

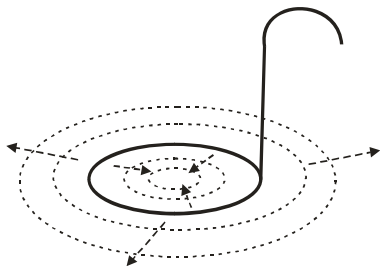
Všetky vlny sa dajú vytvoriť zadaním počiatočných podmienok. U mechanických vln zadaním výchylky (deformácie) a rýchlostí všetkých elementov prostredia v jednom čase. U elektromagnetických vln zadaním rozloženia intenzity elektrického a magnetického poľa. Samozrejme stačí udať hodnoty v miestach, kde sú odlišné od nuly – ale treba povedať i to, že v ostatných miestach sú tie hodnoty nulové.

Napríklad: pridaním kvapky na kľudnú hladinu kvapaliny by sme „deformovali“ hladinu a tým by sme vytvorili vlnu. Pretože povrch kvapaliny by nezostal zakrivený, vyrovnával by sa a tým by vyvolával pohyb susedných miest prostredia. Keď je tá vlna vytvorená v jednom mieste, tak to bude kruhová vlna, pretože rýchlosť šírenia sa vlny je vo všetkých smeroch rovnaká. Pri tom amplitúda vytvorenej vlny sa bude so vzdialenosťou od miesta vzniku znižovať, pretože energia sa musí rozdeliť na postupne sa zväčšujúci obvod toho kruhu.⁵⁾

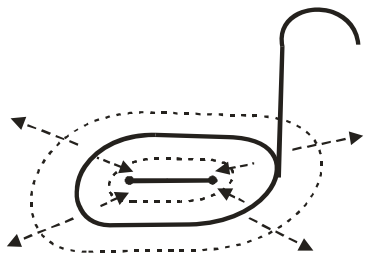
⁵⁾ Pozor! V niektorých materiáloch, napríklad v krištáľoch, rýchlosť šírenia sa mechanických vln závisí od smeru, v ktorom sa vlny šíria.

Rekonštrukcia vln zadaním počiatočných podmienok

Keby sme chceli „rekonštruovať“ napríklad vlnu vyvolanú dopadom kvapky, ale videli by sme iba kruhové vlny neskôr, ako kvapka dopadla, mohli by sme podľa tvaru vlnoplochy v jednom okamžiku zistiť, kedy a kde bola tá vlna vytvorená. Stačí na to z primerane hrubého drôtu vymodelovať teliesko, ktorého tvar je tvarom a veľkosťou zhodný (alebo aspoň blízky) tej vlnoplochy, ktorú sme videli (a zaznamenali jej tvar a veľkosť). Keď sa tým telieskom dotkneme kludnej hladiny, vytvorí sa vlna, ktorá je opakovaním pôvodnej vlny od okamžiku záznamu. A zároveň sa vytvorí vlna, ktorá sa šíri smerom „späť“, ktorá je opakovaním pôvodnej vlny pred okamžikom, v ktorom bol „záznam“ vytvorený. (Akoby čas plynul opačným smerom.) Tá spätná vlna v jednom okamžiku „zobrazí“ pôvodnú vlnu v okamžiku jej vzniku.⁶⁾



Takto môžeme vytvárať rekonštrukciu nie len kruhových vln. Ak na hladinu necháme dopadnúť napríklad zápalku, vytvorí sa vlna s tvarom oválu. Takže pre rekonštrukciu takej vlny treba použiť teliesko s tvarom oválu. I v tomto prípade sa vytvorí rekonštrukcia pôvodnej vlny „po okamžiku“ vytvorenia zoznamu a „spätná vlna“, ktorá je opakovaním pôvodnej vlny pred vytvorením záznamu. Tá spätná vlna v jednom okamžiku vytvorí „vlnový obraz zápalky“ (vytvorí stav blízky stavu v okamžiku vzniku pôvodnej vlny).



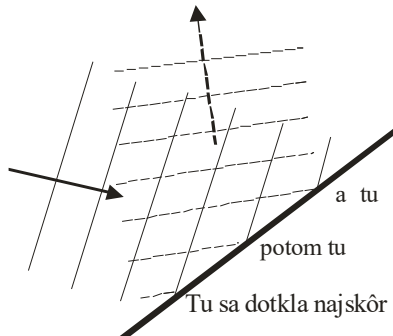
Ale „obraz“ vytvorený takýmto rekonštrukčným telieskom nebude celkom verný. Je to spôsobené tým, že „rekonštrukčné teliesko“ sme neurobili dobre: v kruhovej časti to teliesko malo byť tenšie ako v rovinnej časti, pretože v kruhovej časti sa zápalkou vytvorená vlna „rozbieha“ a jej amplitúda so vzdialenosťou klesá, zatiaľ čo v rovinnej časti nie. Preto je amplitúda „vlnového obrazu zápalky“ na okrajoch väčšia (ako by zápalka mala dve hlavičky).

⁶⁾ Pri demonštrovaní pre väčší počet ľudí je vhodné použiť akvárium so skleneným dnom a spodné osvetlenie. Osvedčili sa „spätné projektor“y.

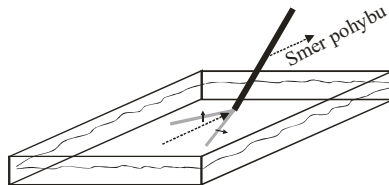
Pozorované rozdiely a ich vysvetlenie dokumentuje, že uvedený popis rekonštrukcie vln je v zhode s procesmi, ktoré sa v tom prostredí odohrávajú.

Rekonštrukcia vln odrazom vln

Odraz vln na okraji prostredia sa uskutočňuje tak isto ako odraz na konci jednorozmerného prostredia: výchylka odrazenej vlny je v každom čase a v každom mieste taká istá ako vlny dopadajúcej. Rozdiel je v tom, že vo viac rozmernom prostredí sa odrazy v rôznych miestach nemusia konať súčasne a výchylka a fáza vlny v rôznych miestach odrazovej plochy je odlišná. Preto sa odrazená vlna šíri (spravidla) iným smerom ako vlna dopadajúca a tvar vlnoplôch nie je jednoznačne určený tvarom vlnoplôch dopadajúcej vlny – závisí i od tvaru odrazovej plochy. Ale vždy platí, že fáza odrazenej vlny je v každom mieste odrazu zhodná s fázou dopadajúcej vlny. Jednoduchý príklad odrazu rovinnej vlny na rovinnom okraji prostredia (alebo rovinnnej prekážke) je na priloženom obrázku.



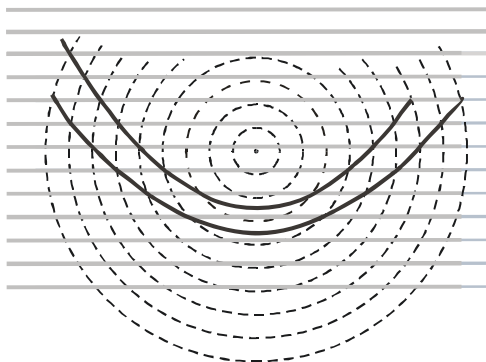
K pochopeniu súvislosti meniacej sa fázy na odrazovej ploche a smeru šírenia sa odrazenej vlny môže pomôcť demonštrácia generácie vlny vytvorenej pohybujúcim sa predmetom na povrchu kvapaliny.



Tá analógia spočíva v tom, že miesto, do ktorého vlna príde na odrazovú plochu, sa posúva rovnako ako tyčka, ktorá vyvoláva vlnu na ob-

rázku. A zároveň to demonštruje, že uhol dopadu sa rovná uhlu odrazu: tie šikmé vlny vytvorené pohybom tyčky sú na obe strany odklonené rovnako.

Trochu zložitejší (ale zaujímavejší) je odraz na krivej prekážke. Zaujímavejší je tým, že odrazená vlna nemusí mať taký istý tvar ako vlna dopadajúca. Ten fakt umožňuje napríklad pýtať sa, či existuje taký tvar odrazovej plochy, na ktorej by sa (napríklad) rovinná vlna zmenila na kruhovú. Pri hľadaní toho tvaru, môže využiť to, čo sme videli pri odraze rovinatej vlny na rovinnom rozhraní – že fáza dopadajúcej a odrazenej vlny je v každom mieste odrazovej plochy rovnaká. Že taká plocha, na ktorej fáza rovinatej a kruhovej vlny existuje, je vidieť z priloženého obrázku. Prerušovanými čiarami (kružnicami) sú na tom obrázku zakreslené miesta, v ktorých kruhová vlna (v istom čase) nadobúda maximálnu hodnotu. A plnými sivými čiarami sú zakreslené miesta, v ktorých (v tom istom čase) tá rovinná vlna nadobúda maximálnu hodnotu.

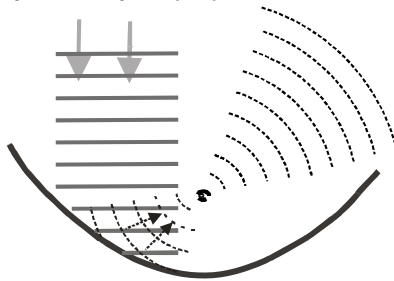


Takže tam, kde sa tie čiary (tie vlnoplochy kruhovej a rovinatej vlny) pretínajú, tam tie vlny majú rovnakú fázu (kmitajú naraz). Že taká plocha, na ktorej fáza rovinatej a kruhovej vlny existuje, je vidieť z priloženého obrázku. Prerušovanými čiarami (kružnicami) sú na tom obrázku zakreslené miesta, v ktorých kruhová vlna (v istom čase) nadobúda maximálnu hodnotu. A plnými sivými čiarami sú zakreslené miesta, v ktorých (v tom istom čase) tá rovinná vlna nadobúda maximálnu hodnotu. Takže tam, kde sa tie čiary (tie vlnoplochy kruhovej a rovinatej vlny) pretínajú, tam tie vlny majú rovnakú fázu (kmitajú naraz) a tými miestami prechádzajú tie plné čierne čiary, ktoré určujú, aký tvar má mať plocha, na ktorej sa bude rovinná vlna odrážať tak, že z nej bude vlna kruhová

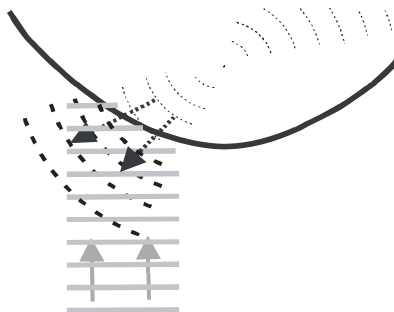
(v 3D guľová). V tomto prípade (vlny v 2D) tým tvarom je parabola. (Vyplýva to z definície paraboly a definície kružnice). V trojrozmernom prostredí by to bol paraboloid. Z uvedeného obrázku je vidieť aj to, že takých plôch je veľa.

A teraz nechajme na teleso, ktorého povrch má tvar paraboly, dopadať rovinnú vlnu, ktorá sa šíri v smere osi tej paraboly. V takom prípade sa odrazom tej rovinnnej vlny vytvorí kruhová zbiehajúca vlna, ktorej stred je v ohnisku tej paraboly.

Odrazená vlna bude kruhovou vlnou, pretože tá rovinná vlna tam v každom mieste vytvorila rozloženie výchylky, aké prislúcha tej kruhovej vlne (mali tam rovnakú fázu) a šíri sa na opačnú stranu (tak isto ako vlna odrazená od rovinného rozhrania.)



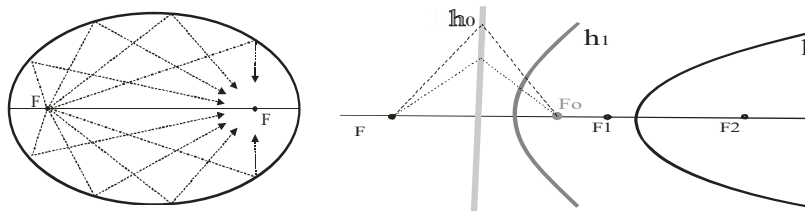
Keby sme na tú parabolu nechali dopadať kruhovú vlnu so stredom v ohnisku paraboly, tak by sa vytvorila rovinná vlna, ktorá sa šíri v smere osi tej paraboly.



A keby sme tú rovinnú vlnu nechali na parabolu dopadať z jej opačnej strany, tak odrazená vlna bude opäť kruhová vlna, ale bude to rozbíhavá kruhová vlna.

O tom, že rovinná vlna sa na parabolickom zrkadle odráža do ohniska paraboly, je známe už viac ako tisícrocie (Archimedove štíty, astronomické zrkadlá). Ale taká premena tvaru vlny odrazom na plochách, na ktorých majú dve vlny rovnakú fázu, môže byť zaujímavá, pretože taká transformácia vln odrazom sa nedeje iba na parabolách a umožňuje to „vysvetliť“ podstatu funkcie rôznych vlnových procesov. A nie len mechanických vln. Dokonca i podstatu holografie.

Takéto obrázky, ilustrujúce odraz vln na kužeľosečkách, môžu ilustrovať (pre niekoho prekvapivý) súvis matematiky a fyziky: Tak, ako sme videli, že na paraboloide sa rovinná vlna transformuje na guľovú (a naopak guľová na rovinnú), tak na elipsoide sa guľová vlna vychádzajúca z jedného ohniska transformuje na zbiehavú guľovú vlnu so stredom v druhom ohnisku elipsy a na hyperbole sa guľová vlna vychádzajúca z jedného ohniska hyperboly transformuje na rozbiehavú vlnu so stredom v druhom ohnisku hyperboly.

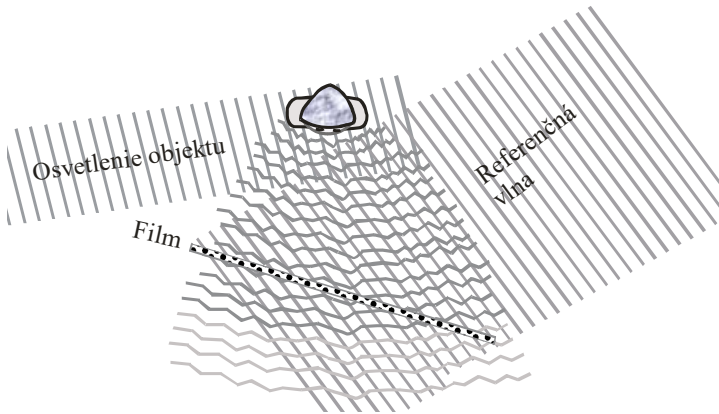


Z faktu, že hyperboly sú tým menej zakrivené čím je menší rozdiel ich vzdialeností od ohnisk, vyplýva prekvapivý dôsledok: keď je ten rozdiel nulový, hyperbola je úplne rovná – je „degenerovaná“ – stane sa priamkou kolmou k ose hyperboly, ktorá je rovnako vzdialená od jej ohnisk. A takáto „hyperbola“ je identická s obyčajným rovinným zrkadlom. Rozbiehavú kruhovú (v 3D guľovú) vlnu transformuje na rozbiehavú kruhovú vlnu so stredom rovnako vzdialeným od zrkadla, ale na druhej strane zrkadla. Je to pekné. Všetak?

Keď v popise transformácie rovinnej vlny na kruhovú (ktorý sme uviedli v predchádzajúcich odstavcoch) označíme tú kruhovú vlnu ako „objektovú vlnu“ a rovinnú vlnu by sme označili ako „referenčnú vlnu“, tak popis toho ako sa tie vlny premenili je v zhode s definíciou holografie: Hologram je záznam interferenčného poľa objektovej vlny a referenčnej vlny, ktorá je koherentná s objektovou vlnou. Pri odraze alebo prechode rekonštrukčnej vlny (ktorá musí byť zhodná s použitou referenčnou vlnou) cez hologram, sa vytvorí rekonštrukcia objektovej vlny.

Holografická rekonštrukcia

Optický hologram sa samozrejme nevytvára z drôťikov alebo parabol pretože vlnové dĺžky svetla nie sú centimetre, alebo milimetre, ale zlomky mikrometra. Ale aj tak sa dá ten záznam vytvoriť, napríklad vo fotografickej emulzii. Osvetlením takej emulzie sa v nej vytvárajú drobné (zlomok mikrometra veľké) zrníčka striebra. Keďže ich množstvo závisí od intenzity osvetlenia v danom mieste, tak sa v maximách interferencie objektovej a referenčnej vlny tých zrníčok vytvorí viac.



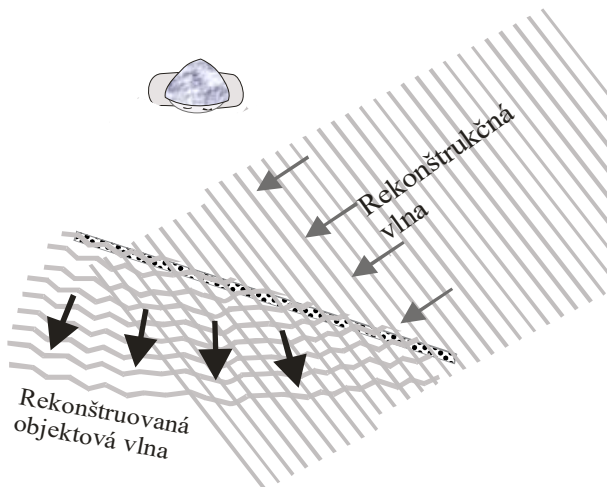
Keby objektová vlna bola guľovou vlnou a referenčná rovinovou vlnou, tak by sa tých zŕn vytvorilo najviac na parabole. Ale objektová vlna je súčtom miliardy guľových vĺn vytvorených z osvetľovacej vlny odrazom do rôznych smerov a s rôznymi fázami (pretože sa vytvárajú v rôznych vzdialenostiach od zdroja), takže objektová vlna je skoro vždy veľmi nepravidelná „hrboľatá“ vlna.

Ale špeciálny film s dostatočne malými zrnami striebra dokáže zaznamenať, kde boli maximá osvetlenia (kde objektová a referenčná vlna mali rovnakú fázu). To je „spoločný základ“ holografie a rekonštrukcie vĺn odrazom.

Rozdiel medzi rekonštrukciou vĺn odrazom na vhodných plochách a holografie je i v tom, že holografická rekonštrukcia sa nemusí vytvárať odrazom. Môže sa vytvárať i difrakciou, „čiastočným prechodom“ cez hologram, pretože hologram nie je kompaktné teleso a tak rekonštrukčná vlna môže prejsť cez „medzery“ medzi zrnami striebra

Takým prechodom sa tá vlna samozrejme mení. Ale ľahko sa dá predstaviť, že vlna ktorá sa vytvorí odrazom na zhlukoch striebra je taká

istá ako vlna ktorá by prešla „dierami“ ktoré by boli práve tam kde sú v zázname maximá. A ešte ľahšie sa to dá predstaviť keby tá vlna prechádzala „negatívom“ pôvodného záznamu.



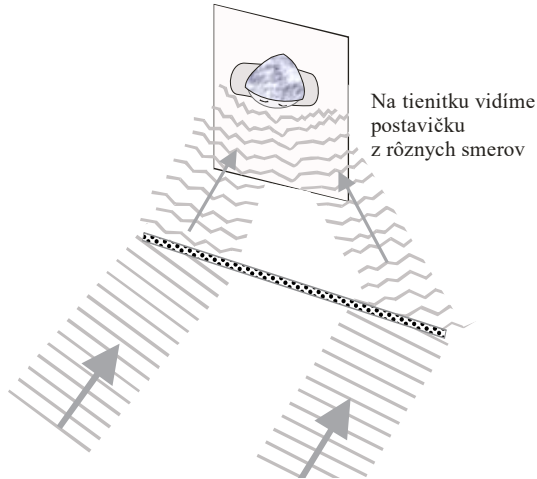
A tak, keď cez hologram necháme prechádzať rekonštrukčnú vlnu zhodnú s referenčnou vlnou, vytvorí sa rekonštrukcia objektovej vlny, ktorá v našich očiach sprostredkuje „priestorový vnem“ zaznamenaného objektu (pretože je identická s pôvodnou objektovou vlnou prostredníctvom ktorej objekty vidíme). To, že tie vlny sú identické sa prejaví napríklad i tým, že rekonštruovaná vlna umožňuje vidieť ako ďaleko je ten objekt od hologramu.⁷⁾

Živý hologram

Keby sme holografický záznam objektovej vlny tej figúrky osvetlili rekonštrukčnou vlnou z druhej stany, tak by sa vytvorila rekonštrukcia objektovej vlny, ktorá by sa šírila opačným smerom, smerom k miestu, v ktorom objekt v priebehu zoznamu bol. Takže v mieste, kde bol ten objekt, by sa na tienidle vytvoril obraz zaznamenaného objektu. Keď to tienidlo bude „presne“ v mieste, v ktorom bol objekt, vytvorený obraz bude „zaostrený“.

⁷⁾ Na uvedených obrázkoch je „objektom“ malá figúrka a je nakreslená pri pohľade „zhora“ takže je nakreslená iba hlava a časť ramien. Prečo, to vyplynie z ďalšieho textu.

Pri tom stačí osvetliť malú časť hologramu (napríklad laserovým ukazovátkom) a vytvorí sa obraz „celého objektu“. A nezávisí to od toho, ktorú časť hologramu by sme osvetlili.⁸⁾



Obrazy vytvorené z rôznych miest hologramu však nebudú celkom rovnaké – budú to obrazy toho, čo by sme videli, keby sme sa na objekt dívali z rôznych miest (z tých miest ktoré sme pri rekonštrukcii osvetlili).

Takže: keď pri vytváraní rekonštrukcie objektovej vlny budeme premiestňovať miesto, v ktorom hologram osvetľujeme, na rekonštrukcii sa to prejaví ako by sa objekt trochu pootáčal – akoby sme hologram „oživilí“.

Demonstráciou „oživeného hologramu“ končia tieto námety na spustenie výuky fyziky a snáď neprekročil hranicu medzi veľa a príliš. A tým, ktorí prípadne niektoré z predložených námetov použijú, sa ospravedlňujem za príliš podrobný výklad – ten výklad bol určený študentom, ktorí by prípadne článok čítali bez možnosti tie demonstrácie vidieť.

Z podobného dôvodu v príspevku nie je (takmer) žiadne matematické spracovanie. Nie je tam preto, že *účelom demonštrácií je zaujať a vytvoriť predstavu* o podstate demonštrovaných javov. A predstava musí predchádzať matematickému popisu. Matematický popis toho, o čom nemáme predstavu, je zbytočný.

⁸⁾ Keby vlnová dĺžka svetla (farba) použitého na rekonštrukciu bola odlišná od svetla použitého pro tvorbe hologramu, prejavilo by sa to „zväčšením“ (prípadne umenšením) obrazu objektu.