

Dnešná časť bude jednoduchá a menej abstraktná ako predchádzajúce. Zameriame sa na jav polarizácie, ktorý vieme popísať aj bez znalosti kvantovej fyziky, ale popritom ide o čisto kvantovú vlastnosť svetla, resp. fotónov. Polarizáciu používame pri fotografovaní, v 3D kine, v tenkých ("flat") LCD monitoroch, atď.

Popisom a pochopením svetla sa zaoberali takmer všetci známy fyzici. *Isaac Newton* ho považoval za prúd častíc, neskôr však prevládol názor, že svetlo je vlnením. Zdalo sa, že konečnú bodku za týmto sporom dal *James Clark Maxwell*, ktorý sformuloval teóriu spájajúcu elektrinu a magnetizmus. Podľa tejto teórie je svetlo špeciálnym prípadom tzv. elektromagnetického vlnenia. Začiatok 20.storočia však naše chápanie svetla úplne zmenil. Jednoduchá otázka *čo je svetlo* je jednou z najkomplikovanejších otázok a ešte stále nemáme k dispozícii uspokojivú odpoveď. Neznamená to však, že by sme vôbec svetlu nerozumeli. Poznáme presne zákonitosti, ktorými sa riadi. Naše "nechápanie" je priamym dôsledkom našich problémov so základnými zákonitosťami kvantového sveta.

Koncom 19.storočia sa ľudia odporovali závislosti, ktorá popisovala aké svetlo vyžarujú zohriate telesá, resp. ako vyžarovanie závisí od teploty telesa (tzv. *zákon žiarenia čierneho telesa*). Akékoľvek pokusy o vysvetlenie tejto závislosti však stroškotali a tzv. klasická fyzika narazila na vážny problém (tzv. *ultrafialová katastrofa*), pretože jej predpovede boli v úplnom rozpore s tým, čo sa pozorovalo. Nastal čas na radikálne zmeny. *Max Planck* vyslovil na prelome storočí na tú dobu veľmi zvláštnu domnienku, že svetlo sa vyžaruje iba v malých, viac už nedeliteľných, kvantách energie. Použijúc tento predpoklad *Max Planck* uspokojivo a úplne presne odvodil zákon žiarenia čierneho telesa, čím položil základný kameň kvantovej fyziky. Tieto kvantá energie boli neskôr pomenované *fotónmi* a táto predstava nám umožnila pochopiť mnoho iných javov, s ktorými si klasická fyzika nevedela poradiť.

V učebniciach dnes nájdeme, že svetlo je prúdom fotónov, t.j. kvánt energie. Tieto častice však majú aj charakteristiky ako vlnová dĺžka a frekvencia, ktoré vyjadrujú energiu jednotlivých fotónov podľa známeho Planckovho vzťahu $energia = h \times frekvencia$, kde sme použili označenie h pre tzv. Planckovu konštantu. Z nášho pohľadu rôzna frekvencia (energia) fotónov zodpovedá rôznym farbám, t.j. zelený receptor v našom oku je citlivý iba na dávku kvanta energie zeleného svetla. Bohužiaľ jediný fotón (ide skutočne o veľmi malú dávku energie) naše oko nedokáže zachytiť a vnem vzniká iba ak je počet fotónov dostatočne veľký.

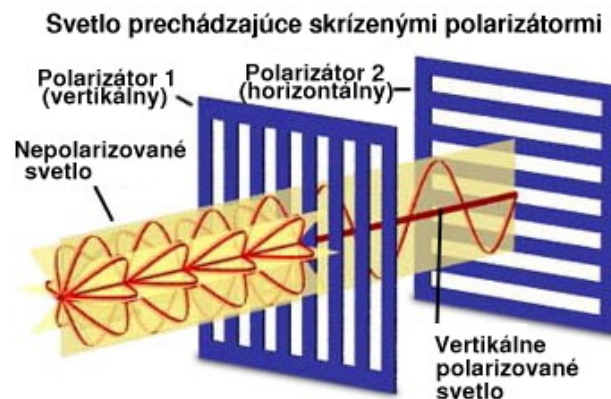
Polarizácia svetla v klasickej fyzike

Vlnová dĺžka, resp. frekvencia fotónov priamo súvisí s chápaním svetla ako elektromagnetického vlnenia. Podľa tejto klasickej teórie je svetlo súčasným prejavom kmitania elektrického a magnetického poľa. Elektrické, aj magnetické pole je však vektorovou fyzikálnou veličinou, t.j. okrem svojej veľkosti majú tieto polia aj určitý smer a pri pohybe svetla kmitajú v nejakom smere (vždy kolmom na smer šírenia sa svetla). So smerom vektora

elektrického poľa spájame pojem polarizácie. Polarizácia je teda vektorová fyzikálna veličina, ktorá udáva, v ktorom smere svetlo "kmitá". Naše oko na polarizáciu svetla nie je citlivé a aby sme javy spojené s polarizáciou mohli pozorovať, potrebujeme pomoc iných zariadení. Polarizátor je špeciálny materiál, ktorý prepúšťa iba svetlo istej polarizácie. Prejavuje sa to tým, že ak sa pozeráme na svetelný zdroj cez polarizátor, tak do nášho oka dopadne menej svetla (menej fotónov), ako keď polarizátor nepoužijeme. Čiže polarizátor "ztemňuje", t.j. *filtruje* svetlo. Preto ho niekedy nazývame aj polarizačným filtrom.

Polarizátory, polaroidy

Bežné svetlo je v skutočnosti zmesou svetiel rôznych polarizácií a nekmitá v žiadnom význačnom smere. Hovoríme, že takéto svetlo je nepolarizované. Avšak akonáhle položíme svetlu do cesty polarizátor, tak za ním už nájdeme svetlo dokonale spolarizované. Zdalo by sa, že polarizátor nám vyberie iba tú časť svetla, ktoré kmitá v tom správnom smere, a všetky ostatné pohltí. Ale nie je to také jednoduché. Ak by sme totižto postavili do cesty ďalší (taký istý) polarizátor (iba inak natočený), tak stále by nejaké svetlo prechádzalo. Zistili by sme, že množstvo prejdeného svetla závisí na natočení druhého polarizátora, alebo trochu matematickejšie: od uhla pootočenia druhého polarizátora vzhľadom k prvému.



Obr.1. Skrížené polarizátory.

Predpokladajme, že svetlo, ktoré dopadá na druhý polarizátor má intenzitu I_1 . Intenzita svetla prechádzajúceho je daná vzťahom $I_2 = I_1 \cos^2 \alpha$, kde α je uhol medzi prvým a druhým polarizátorom. Vidieť (pozri obr.1), že intenzita je nulová iba pre uhly $\alpha=90$ a 270 stupňov, t.j. keď sú polarizátory navzájom kolmé (skrížené). Naopak intenzita sa nemení ($I_2=I_1$), ak je druhý polarizátor nasmerovaný rovnako ako prvý alebo je otočený presne naopak, t.j. pre uhly $\alpha=0$ a 180 stupňov. Ako dôležitý výsledok dostávame, že dva skrížené polarizátory neprepúšťajú žiadne svetlo (pozri obrázok). Presne polovica svetla prejde druhým polarizátorom, ak uhol $\alpha = 45$ stupňov ($I_2=I_1/2$).



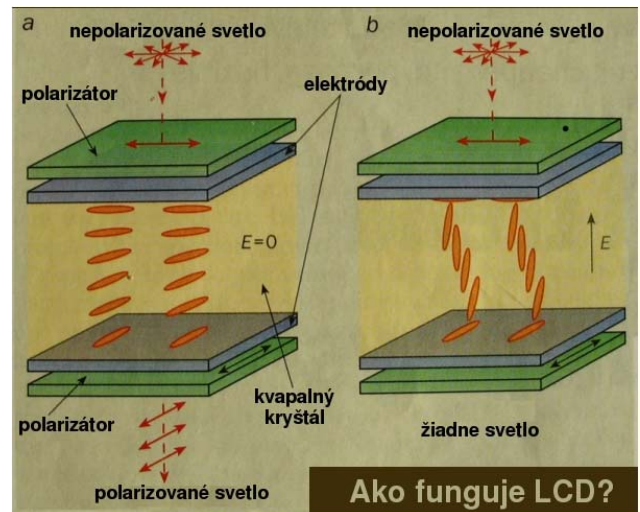
Obr.2. Polarizovaný odraz svetla od vodnej hladiny, alebo vozovky.

Tento jav napríklad využívajú slnečné okuliare, ktoré vďaka polarizačným sklám (filtrom) dokážu odfiltrovať svetlo odrážajúce sa od vodnej hladiny. Odrazené svetlo sa od povrchu vody je polarizované rovnobežne s vodnou hladinou (podobne aj od asfaltovej cesty, skla, alebo snehu). Stupeň polarizácie závisí od uhla pod akým svetlo na povrch dopadá. Úplná polarizácia nastáva, ak sa svetlo od povrchu iba odráža, t.j. keď dopadá pod tzv. Brewsterovým uhlom, ktorý je daný vzťahom $\theta = \arctan(n_{\text{material}}/n_{\text{vzduch}})$. Pripomeňme, že n_{material} označuje index lomu materiálu, ktorý je pomerom rýchlosti svetla vo vákuu (cca 300 000 km/s) ku rýchlosti šírenia sa svetla v danom materiáli. Pre sklo je $n=1.5$ a $\theta=56.3$ stupňa. Pre vodu $n=1.33$ a kritický uhol má hodnotu $\theta=53$ stupňov. Prakticky to znamená, že najviac trblietania na hladine by sme mali vidieť, ak sa pozeráme pod 53 stupňovým uhlom.

S polarizáciou sa môžeme stretnúť napríklad aj pri návšteve 3D kina (pozri box). Takisto pri fotografovaní vďaka polarizačným filtrom dosiahneme obrázky, ktoré voľným okom nikdy nevidíme. Správnym nastavením filtra dokážeme odstrániť čiastočnú polarizáciu modrej oblohy (oslňujúci lesk) a dostaneme krásne modrú oblohu. Fungovanie a princíp LCD monitorov takisto využíva polarizačné vlastnosti svetla. Polarizáciu vnímajú aj niektoré zvieratá. Napríklad mravce, alebo včely si polarizáciou pomáhajú pri navigácii. Kedysi vraj aj vikingovia na svojich ďalekých cestách po severných moriach využívali tzv. "slnečný kameň" (pravdepodobne polarizačný filter), ktorý im aj vo veľmi zlej viditeľnosti umožňoval lepšiu orientáciu. Nemenej zaujímavé možnosti nám polarizácia ponúka pri kvantovom popise svetla, kde namiesto o vlnení hovoríme o časticiach - fotónoch, z ktorých sa svetlo skladá.

Polarizácia kvantovo

Klasický obraz svetla a polarizácie sa nám rýchlo rozplynie, keď prijmeme predstavu fotónov. Ak máme iba jediný fotón, tak elektromagnetické pole pre tento jediný fotón neexistuje. Napriek tomu má každý fotón okrem svojej frekvencie (energie) a hybnosti, aj istú polarizáciu. Ak by tomu tak nebolo, tak by sme mali problém s mnohými experimentmi, ktoré vieme vysvetliť pomocou klasickej predstavy o svetle a jeho polarizácii. V kvantovej teórii namiesto o smere polarizácie fotónu hovoríme o polarizačnom stave fotónu. Poďme sa pozrieť, čo sa vlastne deje s jediným fotónom v polarizátore.



Obr.4. Ako funguje LCD? Nepolarizované svetlo prechodom cez polarizátor a priesvitnú elektródu vstupuje do kvapalného kryštálu, v ktorom sa jeho polarizácia postupne stočí do kolmého smeru. Po prechode druhej elektródy prechádza polarizované svetlo skríženým polarizátorom. Ak na elektródy pripojíme napätie, tak molekuly kvapalného kryštálu sa natočia do smeru poľa, čo spôsobí, že polarizácia sa počas prechodu nezmení. Takto natočené molekuly nijako polarizáciu fotónu neovplyvňujú a teda pri zapnutí napätia svetlo druhým polarizátorom neprejde. Tento jav sa využíva jednak na displejoch kalkulačiek a jednak v moderných plochých obrazovkách

Vezmime si dva rovnaké polarizátory (podobne ako na obr.1), postavme ich za sebou a skúsme či fotón prejde cez obidva polarizátory, alebo nie. V prípade, že sú polarizátory potočené navzájom o 90 stupňov, tak fotón nikdy neprenikne (polarizátory sú navzájom skrížené). Spôsobené je to tým, že fotón ktorý prejde cez prvý polarizátor sa automaticky nachádza v stave určenom týmto polarizátorom. Označme si tento stav ako vertikálny stav polarizácie fotónu. Fotón, ktorý prenikne a dopadá na druhý polarizátor má vertikálnu polarizáciu, a preto druhý, horizontálne nastavený polarizátor, tento fotón zastaví. Ak meníme pootočenie prvého polarizátora, tak pozorujeme, že niekedy fotón prejde, a niekedy nie. Pravdepodobnosť zachytenia fotónu je daná polarizačným stavom, ktorý je určený nastavením prvého polarizátora vzhľadom k horizontálnej rovine. Okrem vertikálne polarizovaných fotónov majú všetky ostatné istú pravdepodobnosť, že ich polarizátor prepustí. Táto náhodnosť je principiálna a polarizátor si skutočne "svojevoľne" vyberá, či fotón prepustí, alebo nie. Jediné pravidlo, ktoré dodržiava sú pravdepodobnosti presne určené kvantovou fyzikou.

Teraz si popíšeme kúzelnický trik, ako vloženie kúska priesvitnej hmoty (polarizátora) donútiť svetlo (fotóny) prejsť aj dvoma navzájom skríženými polarizátormi. Vložme medzi skrížené polarizátory ďalší polarizátor potočený o 45 stupňov. Fotón má 50% šancu, že ním prenikne, avšak ak prenikne, tak je polarizovaný diagonálne a teda má istú šancu, že prenikne aj druhým, horizontálne nastaveným, polarizátorom. Jeho šanca je opäť 50%. Ak pošleme 100 fotónov, tak 50 prenikne cez novo vložený polarizátor a ďalšia polovica z nich, čo je približne 25 fotónov, prenikne aj posledným polarizátorom. Po vložení ďalšieho polarizátora skrížené polarizátory prepustia 25% z fotónov, ktoré sa dostali za

prvý, vertikálne nastavený polarizátor. V istom zmysle teda vieme pomocou vloženia polarizátora urobiť svieti z nesvieti, čo je pre nezasvätených výsledným efektom nášho kúzla. V skutočnosti však nerobíme nič iné, iba využívame jeden zo základných princípov kvantovej teórie, *princíp superpozície*.

Kvantová informatika

Polarizácia fotónu je ideálnym prototypom elementárnej jednotky kvantovej informatiky, tzv. kvantového bitu (o kvantovej informatike sme písali v predchádzajúcich častiach). Logické hodnoty 0/1 sú reprezentované dvoma polarizačnými stavmi, napr. horizontálna/vertikálna polarizácia a všetky ostatné hodnoty kvantového bitu sú definované superpozíciou týchto polarizácií. Pomocou takejto identifikácie nie je žiadny principiálny problém overiť Bellove nerovnosti, rozdistribúovať šifrovací kľúč, teleportovať kvantový stav, alebo aj uskutočniť kvantový výpočet. Vďaka svojej rýchlosti je svetlo skutočne ideálnym kuriérom kvantových správ, avšak polarizácia sa pri šírení (či už vzduchom, alebo optickými káblami) mení v závislosti od podmienok prostredia, ktoré sú prakticky nekontrolovateľné a z nášho pohľadu viacmenej náhodné. Napriek tomu je polarizácia bezpochyby užitočnou vlastnosťou, ktorá si už našla využitie v mnohých zaujímavých aplikáciách. Svetlo, resp. fotóny samotné, dnes hrajú veľmi významnú úlohu takmer vo všetkých realizáciách kvantových bitov a hradíel.

MÁRIO ZIMAN

Ako funguje 3D kino IMAX?

Človek vníma svet okolo seba trojrozmerné vďaka dvom veciam. Po prvé "priestor je trojrozmerný" a po druhé "máme dve oči". Pravé a ľavé oko vidia každé trochu iný obraz. Až skladaním týchto obrazov, ktoré vnímame oboma očami, náš mozog produkuje trojrozmerný obraz sveta. V klasickom kine máme problém s bodom číslo jeden, t.j. obraz ktorý vnímame je dvojrozmerný (premietacia plocha). IMAX technológia rieši problém ako vrátiť tretí rozmer na filmovanej realite.



Princíp je vskutku jednoduchý a práve v tom je jeho genialita. Na filmové plátno sa vysielajú dva obrazy a našou úlohou je ich skladať. K tomu však potrebujeme špeciálne okuliare, ktoré zabezpečia, že každé naše oko vníma iba jeden z týchto obrazov. Svetlá oboch obrazov kmitajú (polarizácia) v navzájom kolmých smeroch. Sklíčka týchto okuliarov sú z takého materiálu, ktorý k Vášmu oku prepustí iba jeden obraz, t.j. jedno z kmitajúcich svetiel. Takto naše oči dostávajú presne také isté vnemy, ako keby sme boli v reálnom priestore, t.j. pravé a ľavé oko majú mierne odlišný obraz, z ktorého si hravo výsledný trojrozmerný obraz poskladáme. Ak by sme si v kine okuliare zložili, tak vidíme iba rozmazaný obraz, čo je dôsledkom toho, že oboma očami vnímame obidva vysielané obrazy.

V kine IMAX je však všetko trochu iné ako v normálnom kine. Pri natáčaní 3D filmu sa nepoužíva obyčajná kamera. Kamera má "dve oči", t.j. dve blízke šošovky snímajú filmovaný predmet a film sa zaznamenáva na dve pásy. Pri premietaní vlastne premietame filmy dva, každý pre jedno oko. Hmotnosť takejto kamery je zhruba 109 kg a pri natáčaní vraj robí hluk ako motorová píla. Ozvučenie filmu sa preto musí robiť až dodatočne. Ak by ste si zblízka pozreli premietaciu plochu IMAX kina, tak si určite všimnete množstvo dierok, do ktorých kľudne vopcháte svoj prst. Tieto dierky nemajú žiadny efekt na kvalitu obrazu, ale skrývajú zvukové reproduktory, ktoré potom umožňujú lepšiu priestorovosť zvuku, a teda lepší celkový 3D dojem.