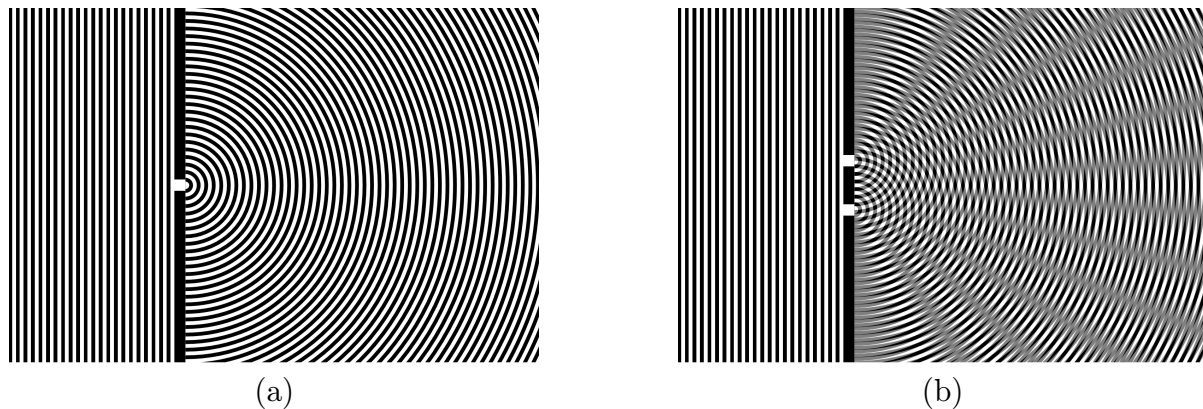


Interference a difrakce kolem nás

Ze všech našich smyslů nám nejvíce informací o našem okolí poskytuje zrak, který reaguje na světlo. Fyzikové se dlouho přeli o tom, zda je světlo spíše vlnění nebo proud částic. Dnes víme, že je to jakási zvláštní kombinace obojího, kterou lze správně popsat jen pomocí zákonů kvantové fyziky. V mnoha běžných situacích se ale světlo chová jako obyčejné vlnění. Jeden ze základních zákonů, kterým se šíření každého vlnění řídí, je tzv. Huygensův princip. Říká, že každý bod, do kterého vlnění dospělo, se sám stává zdrojem vlny, která se následně šíří všemi směry. Vlny ze všech takovýchto sekundárních zdrojů se pak skládají - interferují. V případě, že světlo nemá na své cestě žádné překážky, se výsledná vlna dál šíří pouze v původním směru, protože v ostatních směrech se vlny od mnoha sekundárních zdrojů vzájemně vyruší. Pokud ale na cestě nějaké překážky jsou, může vlna i zcela změnit svůj směr. A to je podstatou difrakce.

Principy, které si vyložíme dále, jsou společné pro všechny typy vlnění. Proto difrakci a interferenci můžeme pozorovat u světla stejně jako u zvuku nebo vln na vodě, či dokonce u de Broglieho vln pravděpodobnosti v kvantové mechanice.

Jak funguje interference a difrakce



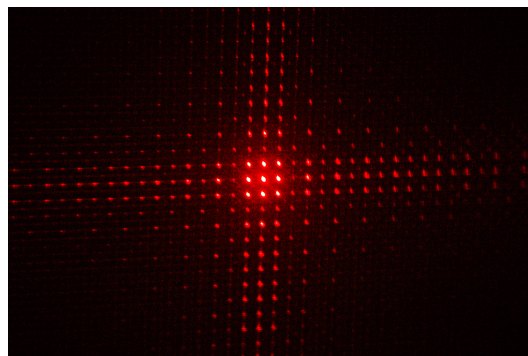
Obrázek 1: (a) Při dopadu světla (zde zleva) na malý otvor v neprůhledné překážce se za otvorem šíří světlo všemi směry, nejen v původním směru. (b) Jsou-li otvory dva, vlny od nich obou se za překážkou skládají. Šedá místa zde odpovídají tomu, že se vlny vzájemně vyruší, a tedy temnotě, bílá a černá místa pak odpovídají zesílení vln a tedy světlu. Na stínítku pak vzniknou světlé a tmavé skvrny.

Představme si např. otvor v neprůhledné překážce, viz obr. 1(a), na který dopadá vlna. Místa v otvoru, kam vlna dospěla, se stávají zdroji vln, které se od nich šíří na všechny strany. Za otvorem se proto světlo rozběhne do širokého úhlu a pokud o kus dál umístíme stínítko (např. bílou stěnu), objeví se na ní skvrna mnohem větší, než je otvor. Nyní si představme, že otvory jsou v neprůhledné překážce dva, viz obr. 1(b). Z každého z nich se světlo šíří do širokého úhlu. Toto vlnění si můžeme představit třeba jako vlny na vodě – střídají se zde místa, kde je hladina snížena (údolíčko) a kde je zvýšená (vrcholek). V prostoru za otvory budou existovat místa, do kterých vlnění od obou otvorů dospěje se stejnou fází, tj. vrcholek vlny od jednoho otvoru se potká s vrcholkem vlny od druhého otvoru a údolíčko se potká s údolíčkem. V takových místech dojde k zesílení vlnění, hladina bude kmitat silně a v případě světelných vln zde bude hodně světla. Naproti tomu budou jiná místa, do

kterých vlnění od obou otvorů dospěje v protifázi - vrcholek jedné vlny se potká s údolíčkem druhé a naopak. Zde se obě vlny vzájemně vyruší a bude zde klidná hladina, v případě světelné vlny pak tma. U vln na vodě to můžeme snadno pozorovat např. tak, že synchronním kmitáním nohou nebo rukou na hladině vytvoříme dva zdroje vln, podobné výše popsaným otvorům; výsledné vlnění je na fotografii na obr. 2(a). Pokud v případě světla dáme za otvory stínítko, uvidíme na něm proto řadu pravidelně rozmístěných světlých a tmavých skvrn - tzv. difrakční obrazec. Jestliže bude otvorů ve stínítku mnoho (pak často mluvíme o difrakční mřížce), bude obrazec ještě složitější a zajímavější. To se dá pozorovat i třeba při pohledu na pouliční lampu přes jemné plátno, viz obr. 2(b).



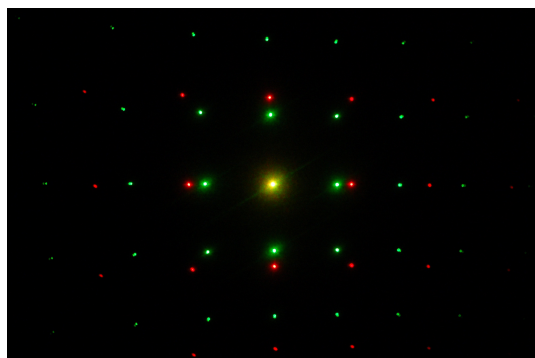
(a)



(b)

Obrázek 2: (a) Interferenci můžeme pozorovat i u vln na rybníku. Synchronním kmitáním nohou vytvoříme dva zdroje vln, podobné výše popsaným otvorům. Je vidět, že do určitých směrů se vlny nešíří, do jiných ano. (b) Obrazec vzniklý na stínítku při svícení laserem přes jemné plátno. Podobný obrazec uvidíme při pohledu přes kapesník na pouliční lampu.

To, jak daleko jsou skvrny od sebe, závisí na vlnové délce, tedy na barvě použitého světla. Posvítíme-li na mřížku bílým světlem, které obsahuje všechny viditelné barvy, výsledkem budou barevné skvrny - světlo různých barev se odchýlí o rozdílné úhly, viz obr. 3(a). Tohoto jevu se využívá např. v mřížkových spektrometrech ke studiu chemického složení vzdálených hvězd. A v běžném životě jej můžeme pozorovat jako krásnou hru barev na cedéčku nebo DVD, což jsou vlastně také jakési difrakční mřížky díky velmi tenké spirálovité drážce, v níž jsou zapsána data.



(a)



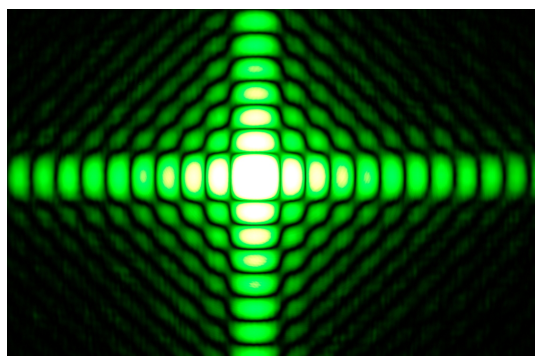
(b)

Obrázek 3: (a) Difrakční obrazec za hustou mřížkou osvětlenou dvěma lasery různých barev. Červené světlo má větší vlnovou délku a odchyluje se proto více než světlo zelené. (b) Barvy na mýdlové bláně vznikající interferencí, tedy skládáním světelných vln. Zde obří bublina, kterou jsme v rámci Zajímavé fyziky vytvořili v botanické zahradě PřF.

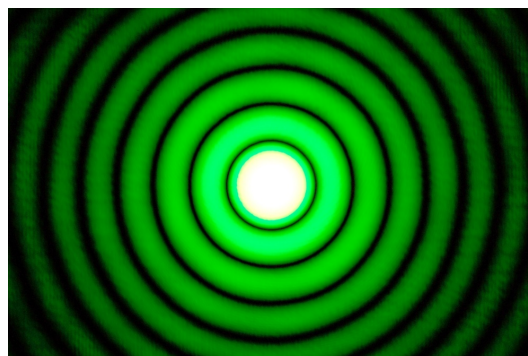
Interference a difrakce se vyskytují i v mnoha dalších běžných situacích a na věcech kolem nás. Například barvenost mýdlových bublin (viz obr. 3(b)) je také způsobena skládáním vln - v tomto

případě odražených od protilehlých stěn mýdlové blány, a na principu interference fungují také anti-reflexní vrstvy na objektivěch fotoaparátů nebo na brýlích. I motýlí křídla nebo perleť vděčí za své krásné barvy skládání světelných vln. Difrakce nachází i řadu uplatnění ve vědě a technice jmenujme například holografii nebo studium struktury krystalů pomocí difrakce Röntgenova záření.

Pěkné difrakční obrazce vznikají i za čtvercovým či kruhovým otvorem, jak je vidět na obr. 4 a 5.

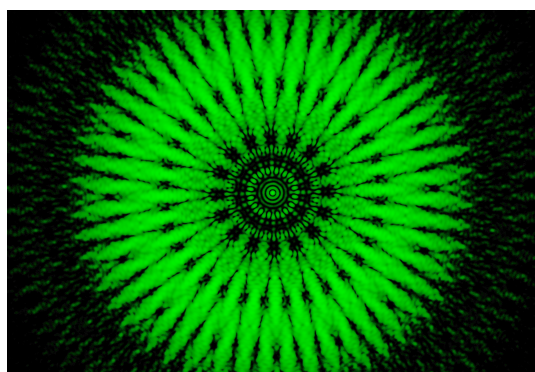


(a)

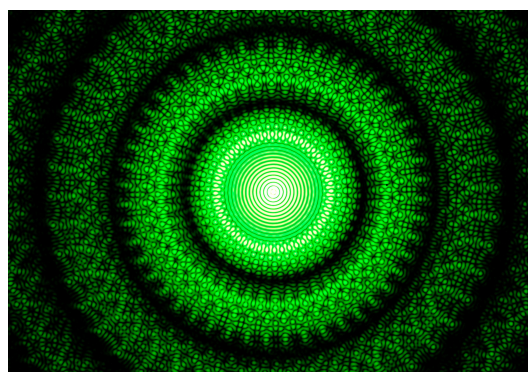


(b)

Obrázek 4: (a) Difrakční obrazec za čtvercovým otvorem. (b) Difrakční obrazec za kruhovým otvorem.



(a)



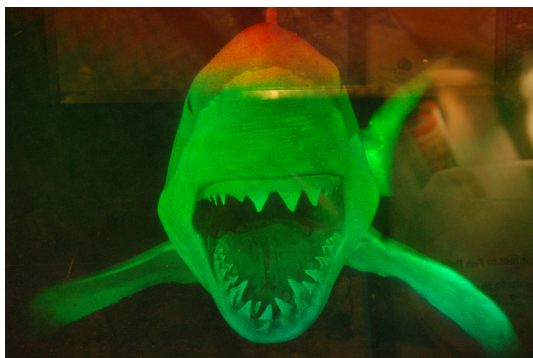
(b)

Obrázek 5: (a) Difrakční obrazec za 16 otvory se středy uspořádanými rovnoměrně na kružnici. (b) Difrakční obrazec za 48 otvory se středy uspořádanými rovnoměrně na kružnici.

Holografie

Holografie je zobrazovací metoda založená na interferenci a difrakci světelných vln. Pro vytvoření hologramu se rozšířený paprsek z koherentního zdroje světla (laseru) nejprve rozdělí na dvě části např. polopropustným zrcadlem. Jedna tato část světla (tzv. referenční vlna) se nechá dopadat přímo na film, na nějž chceme zaznamenat obraz předmětu, a druhá část se nechá dopadnout na samotný předmět tak, aby světlo od něj odražené rovněž dopadalo na film. Na filmu tím vznikne složitý interferenční obraz skládající se z obrovského množství nesmírně úzkých světlých a tmavých proužků, které nemají na první pohled žádnou podobnost s tvarem předmětu. Film se poté, co se na něj tento obraz dostatečně dlouho exponoval, vyvolá. Tím vznikne hologram.

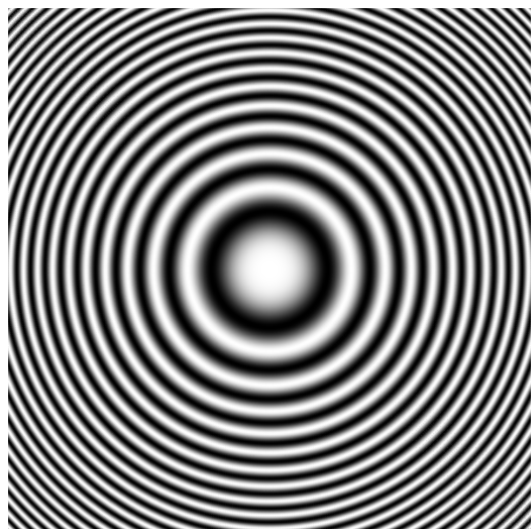
Jestliže nyní osvětlíme hologram vlnou stejnou, jako byla referenční vlna použitá pro vytvoření hologramu, uvidíme při pohledu z vhodné oblasti prostoru krásný trojrozměrný prostorový obraz předmětu ve stejném místě, jako se předmět vůči filmu nacházel při vytváření hologramu. Při změně místa, odkud obraz pozorujeme, ze např. může stát, že některý detail obrazu zakryje jiný, který byl



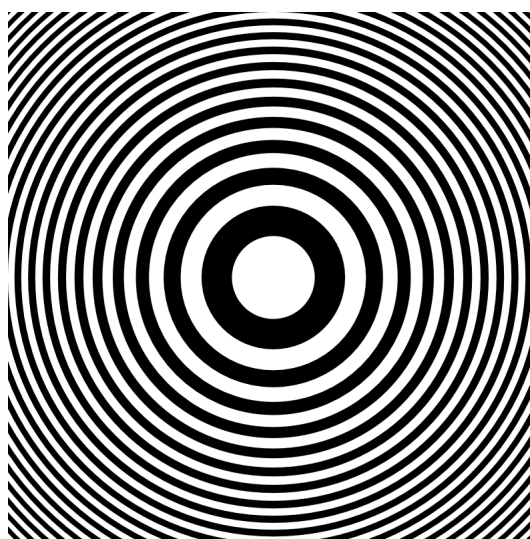
Obrázek 6: Pohled na hologram v akváriu na ostrově Sentosa v Singapuru. Tento imponující hologram o velikosti asi 150 cm jsem vyfotografoval ze dvou míst; odlišnost obrázků ukazuje, že obraz je skutečně trojrozměrný.

předtím vidět, nebo se nový detail naopak objeví, viz obr. 6. Obraz se tedy chová jako skutečný trojrozměrný předmět včetně schopnosti zakrývat apod. (Samozřejmě zakryta může být jen část rekonstruovaného obrazu, nikoli nějaký skutečný předmět v místnosti.)

K nezákladnějšímu pochopení toho, že holografie takto vůbec může fungovat, nám poslouží následující úvaha. Pro jednoduchost si představme, že referenční vlna je rovinná a dopadá na film kolmo. Předmětem pak nechť je pouhý jediný bod, který rovinnou vlnu na něj dopadající odrazí do všech směrů tak, že vytvoří kulovou vlnu šířící se z tohoto bodu na všechny strany. Na filmu pak obě vlny (rovinná a kulová) zinterferují. Výsledný interferenční obrazec je na obr. 8 (a). Jestliže film vyvoláme (pro jednoduchost můžeme předpokládat, že nepoužijeme běžný negativní, ale inverzní proces, tedy že osvětlená místa filmu budou po vyvolání průhledná, zatímco neosvětlená místa budou neprůhledná), vznikne difrakční mřížka, která je vidět opět na obr. 8 (a).



(a)



(b)

Obrázek 7: (a) Hologram bodu vzniká interferencí rovinné a kulové vlny a současně i hologram bodu. (b) Binární verze tohoto hologramu neboli Soretova destička.

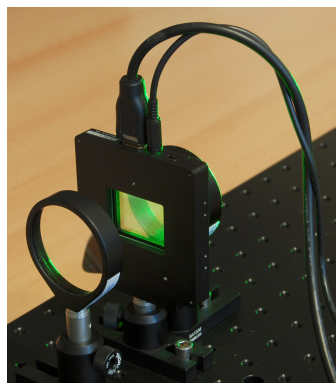
Co se nyní stane, jestliže kolmo na tento hologram necháme dopadnout rovinnou světelnou vlnu? Není těžké vidět, že světlo konstruktivně zinterferuje v bodě, který je ve stejném místě, jako byl původní bod použitý pro vytvoření hologramu. Zde se tedy vytvoří obraz uvedeného bodu, ve shodě s tím, jak bylo popsáno výše.

Jestliže je bodů předmětu více, dojde k interferenci referenční vlny s kulovými vlnami vzniklými na každém z nich. Stejným principem, jaký byl popsán výše pro jeden bod, pak při rekonstrukci vzniknou všechny body předmětu. Jediným problémem by mohlo být, že kromě uvedené interference dojde navíc ke vzájemné interferenci kulových vln od jednotlivých bodů předmětu. Tento jev je spíše nežádoucí. Jestliže je ale referenční vlna výrazně silnější než vlna odražená od předmětu, budou tyto parazitní interference zanedbatelné a výsledný rekonstruovaný obraz nebudou rušit.

Mřížka z obr. 8 (a) má tedy zároveň schopnost soustředit rovinnou vlnu do bodu podobně jako čočka. Proto se jí také jako čočky dá využít, např. pro takové záření, pro které běžné čočky nejsou dostupné (Röntgenovy paprsky). Používá se ovšem spíše binární verze mřížky, kterou vidíme na obr. 8 (b) a která se nazývá Soretova (nebo také zonální) destička.

Prostorový modulátor světla

Rozvoj digitální techniky přinesl do optiky nové možnosti, jak vytvořit světelnou vlnu požadovaných vlastností. Optický element, který je dnes v řadě experimentů již nepostradatelný, je tzv. prostorový modulátor světla (SLM, z anglického Spatial Light Modulator), viz obr. 9 (a). Je to vlastně programovatelný hologram, který obsahuje velké množství (např. 1024×768) okének – pixelů. Každý pixel dokáže měnit fázi světelné vlny podle toho, jaký signál mu pošleme z počítače. SLM se připojuje ke grafické kartě počítače stejně jako monitor. Vytvořením vhodného hologramu v počítači a jeho zobrazením na SLM můžeme získat světelné pole téměř jakýchkoli vlastností, viz obr. 9 (b) a (c).



(a)



(b)



(c)

Obrázek 8: (a) Prostorový modulátor světla (SLM) a (b), (c) jím vytvořené obrazce, které po osvětlení SLM rovinnou vlnou vzniknou na stínítku umístěném za SLM.

Pěkné postery věnované difrakci si můžete stáhnout na stránkách projektu Zajímavá fyzika v sekci „Ke stažení“, viz <http://zajfyz.physics.muni.cz/index.php?web=stazeni>.

Pokusy

- Vlnová vana
 - Šíření ze zdroje všemi směry
 - Štěrbina – ukazuje na Huygensův princip, vlna jde všemi směry pryč
 - Dvojice zdrojů – interference
 - Babinetův princip – dát malou překážku, za ní bude kruhová vlna
 - Dvojice štěrbin – interference, analogie s předchozím

- Mřížka
- Simulace stojaté vlny – použití stroboskopu

- Difrakce světla

- Difrakce na dvojštěrbíně
- Jedna štěrbinu – znovu ukazuje na Huygensův princip, vlna jde všemi směry pryč, ale v některých se vyruší; měníme šířku, pro velmi malou skutečně jde do všech směrů.
- Babinetův princip – štěrbinu jako vlas; šikmý vlas či vlákno; kuželosečky na stěně.
- Kruhový otvor (alobal a jehla)
- Mřížky – CD, měděná síťka, kapesník, šachovnice na diapozitivu atd.
- Soretovy destičky, jejich souvislost s holografí – hologram bodu a popř. i skládání, rekonstrukce
- Hologramy

- Interference světla

- Interference na tenké vrstvě
- Mýdlové bubliny, tloušťka
- Dýchání na brýle nebo na sklo – barevné skvrny
- Mírně namydlené zrcátko a žárovíčka, zajímavé barevné kruhy
- Motýli, kovově modrozelené peří kačerů, perleť – výsledek interference, popř. difrakce na tenkých vrstvičkách

- Prostorový modulátor světla

- Difrakční mřížka
- Zonální destička
- Besselovy módy světla, včetně těch s orbitálním momentem hybnosti
- Vytvoření obecného obrazce, např. fotografie