

Legometrie aneb Michelsonův interferometr očima středoškolských studentů

Stanislav Gottwald, Jakub Jandus, Vít Železný

Gymnázium, Praha 9, Špitálská 2/700, 190 00 Praha 9 – Vysočany; stanislav.gottwald@centrum.cz

Článek seznamuje s konstrukcí interferometru, který vytvořili dva studenti SŠ jako projekt pro seminář z fyziky. První část se zabývá obsahem semináře, další dvě části pak samotným interferometrem ze stavebnice LEGO a užitím 3D tisku s poměrně detailním popisem jednotlivých komponent a případnými konstrukčními překážkami. Závěrečná část pojednává o užití obou verzí interferometru ve školské praxi.

Vybrané kapitoly z fyziky jako možná líheň zajímavých projektů

Seminář *Vybrané kapitoly z fyziky* se na Gymnáziu, Praha 9, Špitálská 2 vyučuje řadu let a je určen pro posluchače třetího ročníku čtyřletého a paralelního ročníku osmiletého studia, případně nepovinnou formou pro studenty o rok mladší. Jeho základní charakteristika je uvedena v ŠVP školy, tedy v [1].

Podle daného dokumentu je při práci na semináři kladen důraz „na samostatnou práci a vyhledávání informací z různých informačních zdrojů, ... rozvoj samostatného kreativního myšlení a zkoumání v oblastech fyziky, které si žáci samostatně volí. Žáci zpracovávají projekty, provádějí měření, chodí na exkurze a veřejné přednášky (AV, MFF apod.). Snahou je zejména podnítit žáky k samostatnému kladení otázek a jejich řešení za pomoci experimentů, vzájemné diskuse, vyhledávání informací na internetu i ve spolupráci s odborníky (zejména na MFF UK). Probíraná témata jsou značně ovlivněna přáním a vlastní iniciativou a aktivitou samotných žáků.“

Samotný obsah je vymezen dosti volně, je tedy velmi variabilní, a může se tak v co největší míře přiblížit



Obr. 2 Měření rychlosti střely pomocí dvojice rotujících kotoučů.

nout k aktuálnímu složení semináře a požadavkům a schopnostem žáků v daném školním roce. Každý školní rok je tedy trochu jiný, každý je svým způsobem originální.

V rámci semináře jsou některá témata striktně určena (i když je hloubka obsahu opět dána volněji a závisí na aktuálních požadavcích studentů), většinu dalších aktivit si však určují studenti sami. Mezi závazná témata patří základní koncepty mechaniky, speciální teorie relativity (STR) a astrofyziky. Většinou začínáme mechanikou, tj. Newtonovými zákony, pohyby v tíhovém poli Země a vztažnými soustavami. Přestože se většina studentů domnívá, že Newtonovy zákony a mechanika vůbec jsou velice jednoduchou a intuitivní částí fyziky, ne vždy to tak bývá a je možné najít řadu nesprávných představ (miskoncepce), které právě v této oblasti bývají dosti zakořeněné, a snažíme se je překonávat. Těžištěm je proto správné použití Newtonových zákonů při popisu reálných situací.

Následně se zabýváme inerciálními a neinerciálními soustavami a porovnáním popisů různých pohybů z pohledu obou soustav. Snažíme se o to, aby studenti



Obr. 1 Exkurze do Astronomického ústavu AV ČR v Ondřejově.

rozlišovali a chápali pojmy pravá a nepravá síla, a kdy mohou tyto pojmy správně použít. Odtud je pak jen krůček k transformacím souřadnic, skládání rychlostí, Michelsonovu experimentu a následně ke STR, paradoxům STR a případně k optickým jevům ve STR. Světlo je pak pojítkem mezi kvantovou fyzikou (mechanismus vzniku světla) a astrofyzikou.

Mezi nezávazná, ale oblíbená a většinou samotnými studenty navrhovaná témata patří například: zkoumání mechanických vlastností materiálu, stavba Leonardových samonosných mostů, měření rychlosti střely (viz obr. 2), pokusy s kapalným dusíkem nebo pevným oxidem uhličitým, zkoumání newtonovských kapalin či pokusy s vysokým napětím (Lichtenbergovy obrazce – viz obr. 3, indukční pec, růžková bleskojistka, Teslův transformátor) apod.

Nejpodstatnější pro osobní rozvoj studentů jsou jejich samostatné projekty. Někteří studenti si již na začátku školního roku vyberou projekty rozsáhlejší, jiní se k rozsáhlejšímu projektům nechají vyprovokovat na základě příkladu svých spolužáků. Ti jsou tak nejen dobrým příkladem pro ostatní, ale i jakýmsi motorem celého semináře. Pro ně pak může být seminář dalším krokem k profesnímu růstu a rozvoji. To je i hlavní smysl semináře. V neposlední řadě pak často vzniknou zajímavé práce, které mohou být prezentovány i mimo školu. Takovými projekty byla např. dvě multimediální CD (vytvořená všemi studenty dvou seminářů) prezentovaná na *Veletrhu* nápadů učitelů fyziky v Brně a Olomouci (viz [2] a [3]), případně prezentace prací jednotlivých studentů v Hradci Králové (viz [4]). Velmi zajímavý byl projekt studentů Jakuba Janduse a Víta Železného ve školním roce 2019/2020, který byl prezentován na *Veletrhu* nápadů učitelů fyziky v Praze v roce 2020 (viz [5]). A právě tento projekt, resp. jeho výsledek, je prezentován samotnými studenty (autory) na dalších řádcích tohoto článku.

Domácí interferometr

Optické interferometry jsou přístroje využívající soustavu zrcadel k poměrně přesnému měření pomocí skládání světelných paprsků do interferenčních obrazců. Mezi ty nejdůležitější patří Michelsonův interferometr (obr. 4). Zkonstruován byl již na konci 19. století k provedení experimentu, který měl kvantitativně změřit rychlost Země vůči éteru – hypotetickému prostředí, jímž se mělo šířit světlo. Paradoxně se stal neúspěšný výsledek měření hřebíčkem do rakve tohoto média. Rovněž byl počátkem zrodu speciální teorie relativity a největší popularizací Michelsonova interferometru. Ani dnes nebyla tato podoba přístroje zapomenuta. Využívána je například v oblasti infračervené spektroskopie či v projektu LIGO pro detekci gravitačních vln. Kvůli svým senzitivním měřením se může interferometr zdát jako zařízení vyžadující pro správné fungování naprosto přesné komponenty, kvalitní zdroj světla (dnes laser), a to vše upevněné na odtlumený optický stůl. V řadě profesionálních využití tomu tak opravdu je, přesto lze přístroj z Michelsonova slavného experimentu replikovat doma jen za použití několika primitivních pomůcek. Výsledkem samozřejmě nebude zařízení schopné přesného měření, ale jakožto edukativní a demonstrační model naprosto postačí.

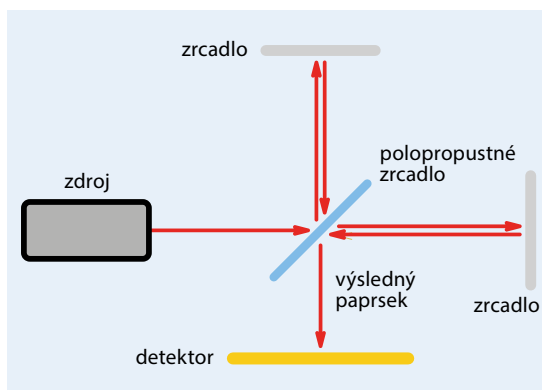
Celé zařízení se neobejde bez několika klíčových komponent, počínaje zdrojem koherentního monochromatického záření, tedy laserem. Pro ten nemusí



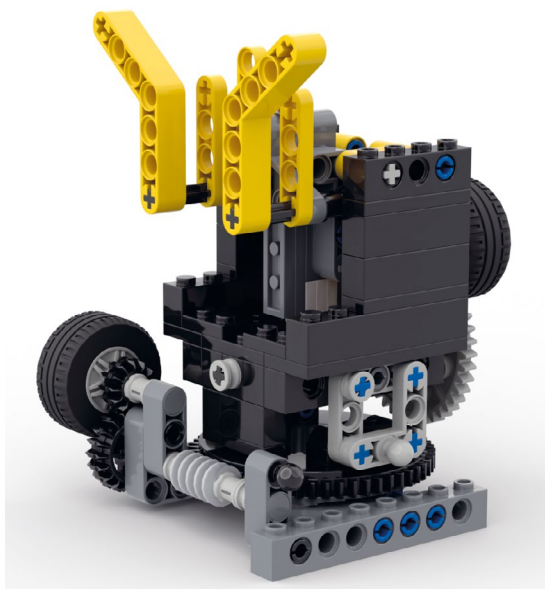
Obr. 3 Vytváření Lichtenbergových obrazců na dřevěné desce.

me chodit daleko, obyčejné laserové ukazovátka bohatě stačí. Stejně tak i zrcadla lze využít téměř jakákoliv, ačkoliv vhodnější jsou tzv. FS zrcadla neboli „first surface mirrors“. Jejich opakem jsou „second surface mirrors“, která jsou mnohem běžnější a mají před odraznou plochou navíc propustnou vrstvu skla či akrylátu. Tato vrstva sama lehce odráží, takže v obrazu zrcadla vznikají tzv. duchové – zdvojení obrazu, které je pro interferometr nežádoucí. Jako čočka pro zvětšení výsledného obrazu poslouží staré brýle či běžná lupa (jakožto spojka bude obraz zvětšovat až za dvojnásobnou ohniskovou vzdáleností, takže přístroj bude muset být od „promítací plochy“ mnohem dál než při použití rozptylky). Jediná hůře dostupná komponenta je dělič paprsků (polopropustné zrcátko). Naštěstí jej můžeme až překvapivě jednoduše vyhledat a zakoupit na internetu za poměrně přívětivé ceny. Dostupný je nejčastěji ve dvou podobách – kostky a sklíčka. Dělič ve tvaru kostky sice lépe rozděluje intenzitu paprsků v poměru 50:50 a stojí sám o sobě, ale hůře se vymýslí konstrukce pro jeho pevné uchycení. Cenově přívětivější sklíčko je naopak bez úchytu prakticky nepoužitelné, ale samotný úchyt může být jednodušší na výrobu (obzvláště pokud má být komponenta vyměnitelná, tedy žádné používání lepidel). Pro dále popisovaný LEGO model bylo zvoleno právě sklíčko.

Pro každou z komponent stačí zhotovit stabilní držák a nejjednodušší provedení interferometru je připraveno k použití. Okamžitě se však objevuje problém se zaměřováním paprsků. Pro správné fungování potřebujeme zrcadla otáčet ve dvou směrech, a tedy zaměřovat paprsky vertikálně a horizontálně. Lze sice s komponenty pohybovat rukou, ale i pro zručného člověka to bude piplavá a zdoluhavá práce, která se stejně nikdy nevyrovná strojové přesnosti.



Obr. 4 Neznámější podoba interferometru.



Obr. 5 Hotový držák zrcadel může vypadat například takto.

Interferometr ze stavebnice

Jako řešení problému zaměřování se nabízí vylepšit držáky jednotlivých komponent, aby umožňovaly precizní vertikální i horizontální otáčení zrcadel. Taková konstrukce není v domácích podmínkách vůbec jednoduchá na výrobu. Jedna z variant, jak držáky zhotovit, je 3D tisk, kterému se bude věnovat druhá část článku. Bohužel jde o způsob, který s sebou nese řadu komplikací a překážek a který není dosažitelný pro každého. Mnohem jednodušší cesta se tak nabízí prostřednictvím stavebnice LEGO. Díky všestrannosti jejích dílků lze snadno sestavit držáky komponent, systém převodů můžeme využít pro zpřesnění pohybů zrcadel, a hlavně je v dnešní době dostupná skoro pro všechny.

Uchycení komponent se bude velmi lišit v závislosti na tvaru samotných optických součástek. Jen stěží se vytváří držák, který by vyhovoval každému zrcadlu. Vhodné je například komponenty „skřípnout“ mezi několika dílky či využít některý z řady gumových LEGO dílů (skvělý je například díl 45590) a zamezit tak nechtěným pohybům. Obecně je důležité, aby byla každá komponenta připevněna co možná nejpevněji, obzvláště zrcadla, která se budou často nastavovat. I malá vůle může vést k nepříjemnému „poskakování“ paprsku ve chvíli, kdy se komponenta nechtěně pohne, a ztěžovat tak zaměřování.

K samotnému zaměřování potřebujeme pohybovat pouze zrcadly. Nutné jsou pak již zmiňované dva stupně volnosti. S širokým výběrem ozubených kol ve stavebnici můžeme snadno dosáhnout vysokého převodového poměru, který zpřesní všechny naše pohyby při ovládání modelu. Problémem zůstává vůle, tentokrát mezi jednotlivými ozubenými koly, která samozřejmě nikdy nebyla stvořena pro takto precizní účely. Zuby nejsou v neustálém kontaktu a při každé změně otáčení musí nejdříve překonat malou mezeru mezi sebou, než začnou zabírat. Výsledkem je tak zpoždění otáčení s ovládací hřídelí oproti otáčení samotné komponenty. Tento efekt se projeví na každém soukolí a stupňuje se s každým přidáním párem ozubených kol.

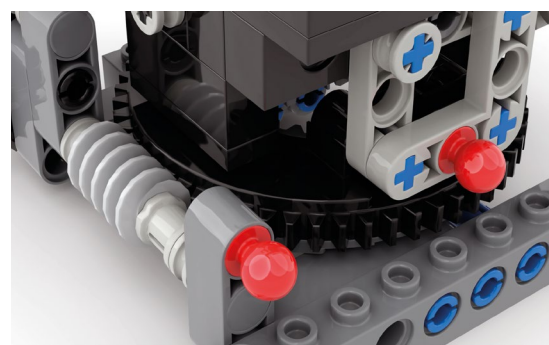
Zlepšení problému s vůlí

Částečným řešením je omezit počet soukolí na minimum. Na druhou stranu si potřebujeme udržet dosta-

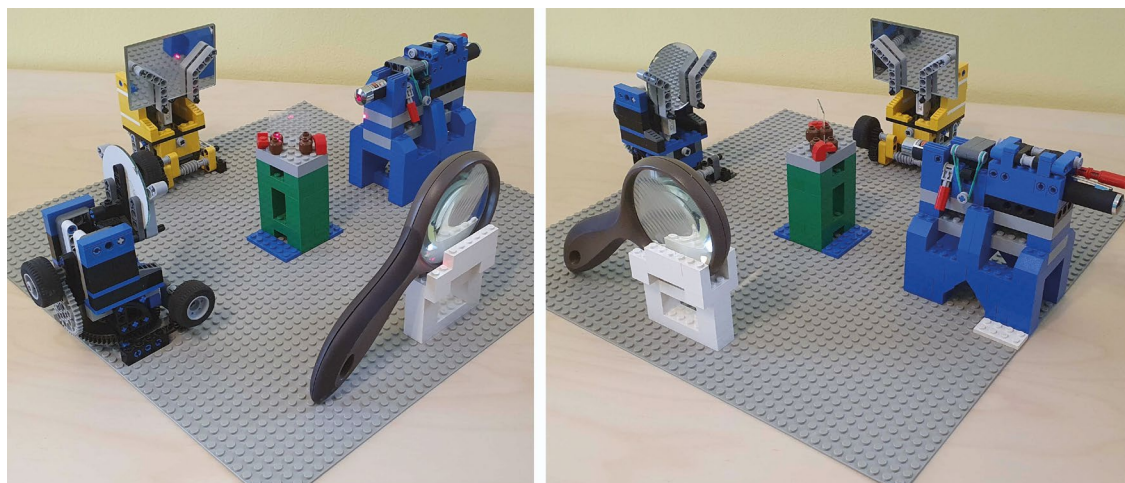
tečný převodový poměr pro zpřesnění zaměřování. Je tedy vhodné vybírat páry dílků s dostatečně rozdílným počtem zubů. Zcela ideální je sestavit tzv. šnekovou převodovku, tedy soukolí skládající se z poměrně obvyčejného hnaného ozubeného kola a hnacího šnekového kola ve tvaru šroubovice. Díky malému počtu zubů na šnekovém kole můžeme dosáhnout velmi vysokých převodových poměrů, které by jinak vyžadovaly několik soukolí sestavených za sebe do složeného převodu. Další výhodou je samosvornost soukolí, tedy v tomto případě schopnost převodu vést pouze jedním směrem. Jinak řečeno, pouze šnekové kolo může být hnací a uvádět celé soukolí do pohybu, naopak točivý moment působící na hnané kolo se šnekem nijak nepohne. V LEGO stavebnici jsou pro tento účel nejlepší dílky šnekového ozubeného kola (4716) a točny (sestavené z dílů 48168 a 48452), která je sama o sobě jedním z největších snadno dostupných ozubených kol. Vůči sobě mají tyto díly relativně velký převodový poměr 56:1 (pro srovnání většina LEGO převodů valivého typu – tedy dvě obvyčejná ozubená kola – nedosahuje poměru ani 10:1). Točna je navíc poměrně stabilní a má skvělé úchytné body pro další nástavbu, takže se k ní dobře přichytává konstrukce držící samotnou komponentu.

Další způsob, jak zmenšit vůli, je využít kola s robustnějším profilem zubů. (Takovým disponují například dílky 32270, 32269 či 32498.) Díky jejich tvaru do sebe zapadají mnohem těsněji než zmíněná točna se šroubovicí, a volný pohyb mezi nimi je tak výrazně menší, ačkoliv stále není nulový.

Nejlépeším řešením problému vůle je využití šnekové převodovky a následné vhodné zapření hnaného kola – jakmile na něj působí točivý moment, natlačí se jeho zuby na jednu stranu šnekového kola a zamezí tak nechtěnému volnému pohybu. Zde přichází vhod samosvornost tohoto převodu. Hnané kolo můžeme beze strachu držet zapřené, zatímco se celý převod ani nepohne. Samotný kroutivý moment můžeme vytvořit několika způsoby. V případě vertikálního otáčení lze využít tíhu zrcadel. V tomto případě je určitá samosvornost soukolí téměř nutností, jinak budou upevněná zrcadla vlastní tíhou pohybovat celým převodem, nebude je nikdy možné udržet na jednom místě, a tedy zaměřit. Pro horizontální směr se skvěle hodí například gumičky (viz obr. 6). Ty však přichází s vlastním problémem, jelikož síla jejich působení není konstantní, ale závisí na jejich prodloužení. Naštěstí je již na točnu na obrázku přímo namontovaná konstrukce držící zrcadlo a točna se nebude otáčet víc než o několik stupňů. Nehrozí tedy, že by se tah gumiček



Obr. 6 Dílky pro uchycení gumičky jsou zvýrazněny červeně; tah gumičky zapře točnu (velké černé ozubené kolo) o zuby šnekového kola (šedá šroubovice vlevo) a odstraní tak vůli v soukolí.



Obr. 7 Hotový interferometr na nejjednodušší možné podložce.

nějak výrazně měnil či se mohly z úchytů uvolnit, nebo naopak prasknout.

Laser a improvizovaný optický stůl

Poslední komponenta, která si vyžaduje trochu pozornosti a péče, je laserový zdroj, tedy nejspíše laserové ukazovátko. Jediné, co od něj potřebujeme, je udržet je zapnuté. Můžeme buď postavit nepříliš složitou konstrukci, která bude držet tlačítko laseru stisknuté nejspíše za použití gumiček, ale stejně tak dobře můžeme použít obyčejný kolíček na prádlo nebo proužek silikonové hadice natažený přes spínač. Ačkoliv nejde o nějak estetická řešení, svou funkčností překonají většinu mechanismů, které bychom ze stavebnice vyrobili.

Výsledkem naší práce je pět dílů držících komponenty – dva pro zrcadla, jeden pro laser, polopropustné zrcadlo a čočku. Pro jednoduchost můžeme všechny rovnou upevnit na některou z velkých LEGO podložek (například díl 10701 s 48×48 výstupky, ale vhodná je jakákoliv podložka, na kterou se všechny držáky vejdou). Výhodou je, že lze komponenty po desce snadno přemísťovat. Nevýhodou je naopak chatrnost podložky – snadno se při každém dotyku prohýbá a na obrazcích je jasné vidět, že neposkytuje prakticky žádné tlumení vibrací. Lepší možností je jednotlivé držáky propojit konstrukcí z větších a pevnějších dílů LEGO, tedy vytvořit malý improvizovaný optický stůl. Solidní základy v podobě několika vrstev kostek o dostatečné hmotnosti mají až překvapivě dobrý efekt na odpružení celého přístroje, což vede ke značnému zlepšení stability obrazců.

Hračka nebo učební pomůcka

Ve finále může LEGO interferometr posloužit jako pěkná ukázka slavného Michelsonova experimentu, ať už jen pro osobní potěšení, nebo pro edukativní účely. Z hlediska kvality výsledků, jimž se věnuje závěr článku, se nemůže rovnat profesionálním aparaturám. I doma vytvořené přístroje zkonstruované za použití sofistikovanějších metod jej předčí. V čem ale zdaleka překonává všechny ostatní, je jednoduchost jeho stavby, díky níž ho lze zkompletovat v řádu hodin, a dostupnost všech komponent a stavebních materiálů, ke kterým má dnes blízko skoro každý. Ale i přesto je nutné se vypořádat s řadou výše uvedených konstrukčních problémů, a tedy se spoustu věcí naučit.

3D tisk

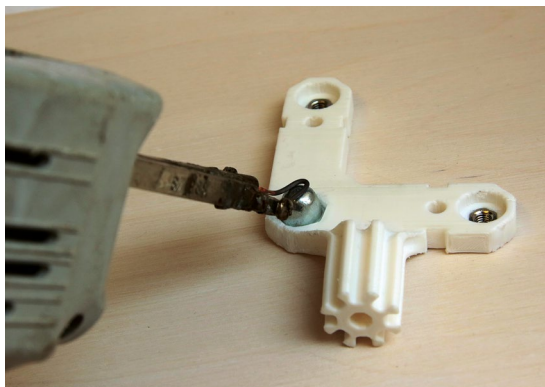
Vedle plastové stavebnice se nabízí řada alternativ s různou dostupností, náročností provedení a rozličnými výsledky. Asi nejpozoruhodnější a nejméně strannější z nich je 3D tisk. Pro veřejnost čím dál dosažitelnější výrobní technologie nabízí velmi výhodný poměr přesnosti a ceny dílů. Je také téměř perfektní pro zdokonalení modelového interferometru. Avšak jako všechny výrobní procesy, i 3D tisk s sebou přináší určitá úskalí.

Před započatím samotného tisku, či lépe před počítačovým navrhováním dílů, je osvědčeným postupem vzít v úvahu hlavní princip tisku nejrozšířenějšího typu 3D tiskáren: FDM (Fuse Deposit Modeling). Jedná se o aditivní proces, kdy jsou na sebe pomalu nanášeny jednotlivé vrstvy roztaveného plastu. Typ plastu a velikost tiskové trysky stanovují pevnost spojení mezi jednotlivými vrstvami. Vzniklé spojení určuje pevnost celého dílu v jeho vertikální ose či v tenkých profilech. Pro dosažení co největší přesnosti byla zvolena tryska o velikosti 0,3 mm. Experimentálně otestovány byly dva typy materiálu: snadno dostupné PLA a na tisk náročnější ASA. Díl vytištěný z PLA je rozměrově velice přesný, avšak nízká přilnavost vrstev může způsobit nechtěné přelomení ramene při jeho kompletaci. Díl z houževnatějšího plastu ASA netrpí problémem křehkého spojení, na druhou stranu byl tisk z důvodu nízké přilnavosti k tiskové ploše úspěšně dokončen pouze v polovině případů.

Komponenty z Orientu

Při výběru netisknutelných klíčových komponent (zdroj koherentního světla, dělič paprsků a dvě zrcadla) byla hodnotící kritéria dvě: cena a náročnost uchycení komponenty k vytvořeným držákům.

Jako zdroj koherentního světla byla na internetu zakoupena laserová dioda, která kromě nízké pořizovací ceny přinesla úsporu ve formě integrované spojky s ohniskovou vzdáleností 12 mm. Laserový paprsek lze usměrnit do tvaru kužele již na počátku jeho dráhy a tím nejen usnadnit vytváření kruhových obrazců, ale zároveň eliminovat potřebu čočky na výstupu interferometru. Samotné pouzdro diody má válcovitý tvar, který umožňuje velice jednoduchou integraci do systému. Pouzdro dále obsahuje čočku i napájecí obvod, který pracuje se vstupním napětím od 3 do 5 V. Relativně dlouhá vlnová délka (650 nm) dále zjednodušuje vytvoření soustředných kruhů, jelikož se při jejich promítnutí jeví širší než za použití jiných částí



Obr. 8 Tepelné zapouštění matic pistolovou páječkou.

spektra. Výkon 5 mW je dostatečně nízký a relativně bezpečný. Přesto se vyvarujte přímého zásahu paprsku do oka a dávejte pozor i na nechtěné odrazy paprsku! Navíc, deklarovaný výkon některých laserových diod nemusí odpovídat realitě.

Dělič paprsků je použit stejný jako u jednoduššího LEGO modelu za účelem snadného vylepšení. Dalšími komponentami, které podstoupily vylepšení, jsou zrcadla. Na 3D tištěném modelu jsou použity dva kusy molybdenových zrcadel o tloušťce 3 mm a průměru 25 mm.

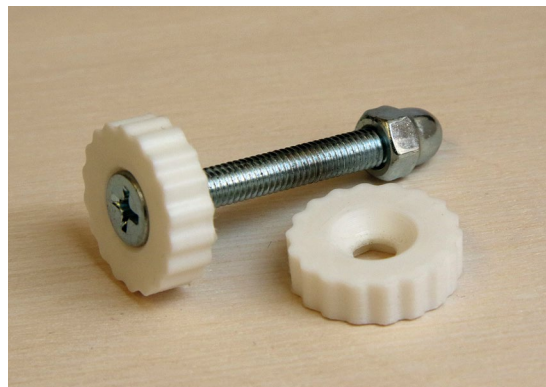
Díly k modulům

Návrh jednotlivých dílů byl vytvořen na míru zakoupeným součástkám. S výjimkou ovládacích šroubů rozměru M5 je velikost zbývajících šroubů a matic standardizována na rozměr M4. Další standardizací je výška paprsků nad podložkou (70 mm) a tvar kinematického držáku.

Kinematický držák

Na základě inspirace profesionálními optickými drážkami využívá náš kinematický držák dva jednoduché mechanické prvky, páku a šroub, pro efektivní ovládnutí úhlu náklonu.

Konstrukční proces začíná vytištěním pilíře se strukturou ve tvaru písmene „L“, do kterého je tepelně zapouštěna klobouková matice velikosti M8 jako kulový kloub dvou na sebe kolmých ramen (obr. 8). V každém z těchto ramen je zasazena maticka M5 ve vzdálenosti 50 mm od středového bodu. Společně s ručním nastav-



Obr. 9 Ruční nastavovací šroub.

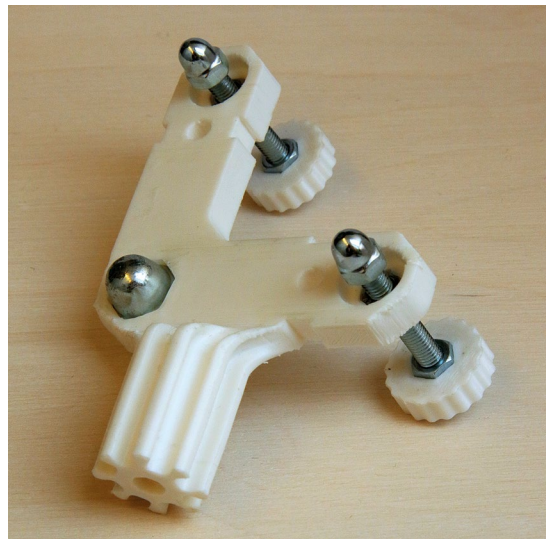
vovacím šroubem (obr. 9) vzniká systém umožňující souběžný náklon zrcadla ve vodorovné i vertikální ose s vysokou přesností. Samotný šroub je na jedné straně zakončen 20mm knoflíkem pro další zjemnění ovládnutí, na druhé pak kloboukovou maticí umožňující klouzávý pohyb drážkou umístěnou v protilehlém dílu. Stoupání závitu šroubu M5 je 0,8 mm. V kombinaci s již zmíněným pěticentimetrovým ramenem utváří pravoúhlý trojúhelník. Teoretickou přesnost změny úhlu náklonu zrcadla po jedné plné rotaci nastavovacího šroubu lze vypočítat jako $\arctg(\text{stoupání závitu šroubu} / \text{délka páky ramene})$, což odpovídá cca 0,9 stupně. Zjemnění ovládnutí by se dalo dosáhnout buď prodloužením páky ramene, nebo použitím šroubu s menším stoupáním závitu.

Na první pohled se může zdát, že čím delší rameno bude, tím lepší bude seřizování interferometru. Do značné míry tento princip platí. Avšak je důležité připomenout, že kromě zvýšené náročnosti tisku dílů může delší rameno (či nižší klobouková matice) omezovat náklon zrcadla. Maximální odchylku od rovnoběžné pozice lze přibližně vypočítat pomocí pravoúhlého trojúhelníku. (Odvěsna délky rovné výšce kloubu; přepona o délce střed kloubu – okraj „L“ ramene.) V případě našeho dílu se jedná přibližně o úhel velikosti $\arcsin(17,5/60)$, což odpovídá asi 17 stupňům. V praxi však nebyly velké úhly náklonu potřeba, a proto by bylo možné ramena o pár milimetrů prodloužit a zvýšit tak jemnost ovládnutí.

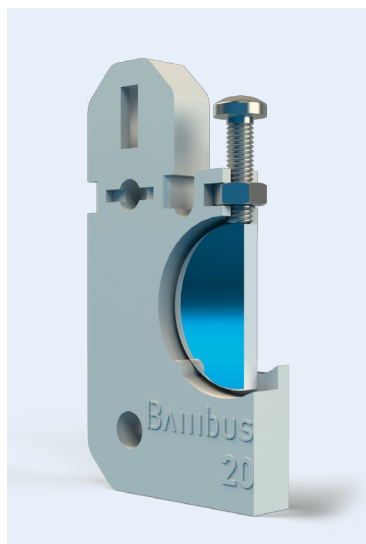
Pomocí gumiček (na obr. 13 červené) je na díl s pilířem (obr. 11) přichycen párový díl nesoucí zrcadlo



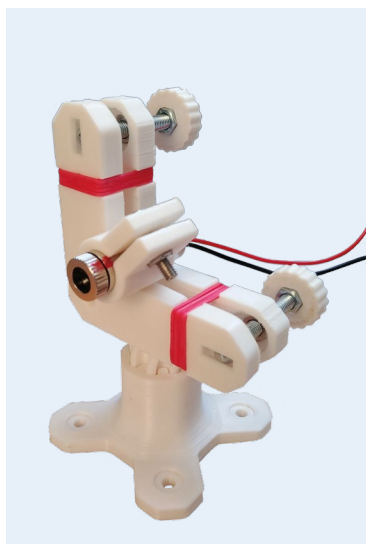
Obr. 10 Držák zrcadla.



Obr. 11 Sestavená část kinematického držáku.



Obr. 12 Řez držáku zrcadla.



Obr. 13 Kompletní kinematický držák diody vložený do podstavce.



Obr. 14 Zkompletovaný modul děliče paprsků.

(obr. 10) nebo jakoukoliv jinou optickou komponentu. Toto pružné uchycení s sebou přináší dvě výhody: pohyblivé upevnění a eliminaci vůle v ovládacích šroubech (jak je popsáno v článku výše). Tímto krokem je sestavování kinematického držáku dokončeno.

Upevnění samotného zrcadla je provedeno ve dvou krocích. Nejprve jej opřeme o malou zarážku, která ho zároveň rovnoběžně s rámem (řez obr. 12). Následně zrcadlo sevřeme mezi dvojicí výstupků a protistojný šroub M4, jehož matice je usazena v příslušném otvoru. Díl nesoucí laserovou diodu je nutné specificky modifikovat pro její upevnění. Místo kulatého rámu pro zrcadlo je tak možné využít pružnost plastu a válcovité pouzdro diody upevnit prostým sevřením (obr. 13).

Díl nesoucí dělič paprsků (obr. 14) nepotřebuje sofistikovaný systém náklonu. Absence pohyblivých částí z něj tvoří jeden z nejjednodušších dílů k výrobě. Upevňovací šroub je vhodné utahovat s citem ručně, aby nedošlo k poškození tenkého sklíčka.

Univerzální upevňovací systém

Pro výrobu univerzálního upevňovacího držáku optických komponent byla klíčová možnost vložení a upevnění pilíře na principu osmihranu (tedy možnost rotace po 45°). Proto byl zvolen tvar hvězdice (inspirováno [7]), který splňuje podmínku všesměrového vložení. Navíc je snadno tisknutelný a jeho tvar vytvoří pevný profil.

Správné upevnění vyžaduje co nejmenší toleranci pilíře ve tvaru hvězdice a samotného podstavce, jinak dojde k nechtěnému viklání. Po několika experimentálních výtiscích vyšlo najevo, že nejmenší mezera, při které jdou pilíř a podstavec bez potíží zasunout do sebe, se pohybuje v okolí průměru trysky, tj. 0,3 mm. Tato tolerance je však pořád příliš velká pro přesnou činnost interferometru. Proto je pilíř ještě šroubem přitlačen k okraji hvězdicového tvaru, a tím jej zafixuje.

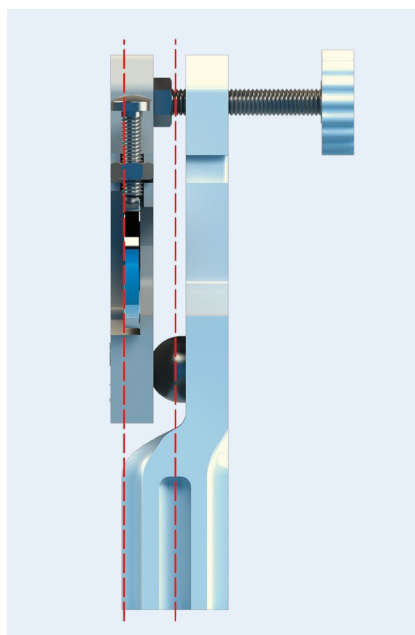
Při počítačovém návrhu pilíře je vhodné dbát na jeho pozici vůči příslušné optické komponentě (např. zrcátku), aby došlo k plnému využití modularity interferometru. V případě, že nebude střed pilíře v ose procházející středem komponenty (obr. 15), může paprsek při otáčení po 45stupňových krocích dopadat

na okraj zrcadla. Pokud bude vyosení příliš velké a budeme chtít zrcadlo využít pod úhlem dopadu 45° , paprsek zrcadlo zcela mine. Avšak posunutí pilíře pod střed zrcadla způsobí jeho značné vyosení vůči zbytku kinematickému držáku, se kterým tvoří jeden díl.

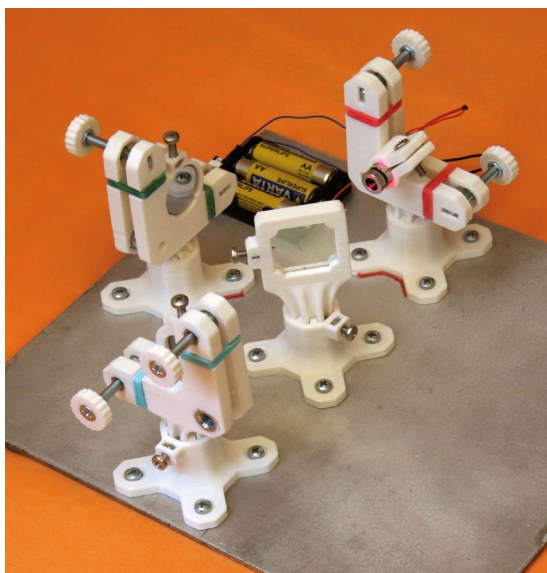
Samotný podstavec (obr. 14 dole) má tvar „X“. Okraje, zkosené pod pětačtyřicetistupňovým úhlem, usnadňují zajištění rovnoběžnosti jednotlivých modulů – stačí k nim přiložit dlouhý rovný hranol. Dále je zde možnost celý modul přišroubovat k podložce skrze čtyři předpřipravené otvory. Připevnění k desce zaručí pevné rozmístění komponent a při volbě tuhého materiálu podložky i snížení některých typů vibrací. Na druhou stranu zde chybí možnost posuvného pohybu. Interferometr tedy není možné využít pro experimenty využívající translaci zrcadla, kdy například pozorovatel počítá počet přechodů v interferenčním obrazci a následným výpočtem může určit velikost okem nepozorovatelného pohybu.

Interference ve stavebnicové i 3D tištěné verzi

S shotovým LEGO interferometrem lze poměrně jednoduše a s relativně velkou přesností zaměřovat paprsky



Obr. 15 Viditelné vyosení odrazné plochy zrcadla vůči středu otáčení (středu pilíře).



Obr. 16 Sestavený interferometr.

z obou ramen. Obrazce utváří zajímavé tvary, místy dokonce takové, které by se s ideálními komponentami ani neměly vytvořit. Přesto nejběžnější jsou obrazce ve tvaru rovnoběžných nebo zakřivených proužků. Dosáhnout oné nejznámější interference v podobě soustředných kroužků je bohužel s podobným provedením interferometru velmi složité či téměř nemožné (respektive najdou se i tací [6], kteří uspěli, ale vzhledem k jejich spotřebě kostek a vůbec velikosti celého projektu se i alternativy jako 3D tisk zdají dostupnější a proveditelnější). I při nejlepšího zaměření, jakého lze s přístrojem docílit, se obrazce jeví spíše jako velké nepravidelné fleky či hodně přibližně křivé čáry. Opravdu kruhové obrazce vznikají, jen pokud jsou paprsky jdoucí z přístroje velmi rovnoběžné, čehož se s plastovou stavebnicí dosahuje obtížně. Z řady problémů můžeme vinit i samotné komponenty. Použitá zrcadla mají daleko k profesionálním a dioda v laserovém ukazovátku má nepatrné vady, které spolu s povrchovými defekty na zrcadlech či na čočce vytváří rušivé neodstranitelné obrazce, tentokrát však nijak nesouvisející s požadovanou interferencí.

Defekty komponent jsou však menším problémem, než jakým jsou vibrace. Na interferenci jsou znatelné pohyby v řádu zlomků vlnové délky použitého světla. Tudíž i zcela nepozorovatelné chvění má na obrazce obrovský vliv. Jednotlivé interferenční proužky neustále nepředvídatelně poskakují, chvílemi se úplně rozplynou, jen aby se za moment znovu objevily. Sensitivita obrazců je znatelná především ve vysokých budovách. Ve vyšších patrech se projevují otřesy celého domu a všeho kolem. Každý krok v místnosti, kde je interferometr umístěn, naruší obrazce natolik, že často úplně zmizí. Největší stability přístroj dosáhne s vylepšenou konstrukcí podložky, popisovanou výše, umístěné do dostatečně klidného prostředí (například blízko základů domů). Za takových podmínek je přístroj natolik klidný, že vedle něj můžeme i luskat prsty a pozorovat, jak na každé jednotlivé lusknutí obrazce reagují. Přesto je přístroj na nežádoucí vibrace stále nesmírně citlivý. Oproti svému jednoduššímu LEGO protějšku přináší 3D tištěný interferometr stabilnější uchycení a snadné zaměřování paprsků. S lepšími moduly a optickými komponentami přichází i známé soustředné kroužky (obr. 17). Na nich můžeme opět sledovat ji-

nak neviditelné mechanické a akustické vibrace. Jasně zřetelný je dokonce i vliv hlasité hudby, která obrazce rozpohybuje do svého rytmu.

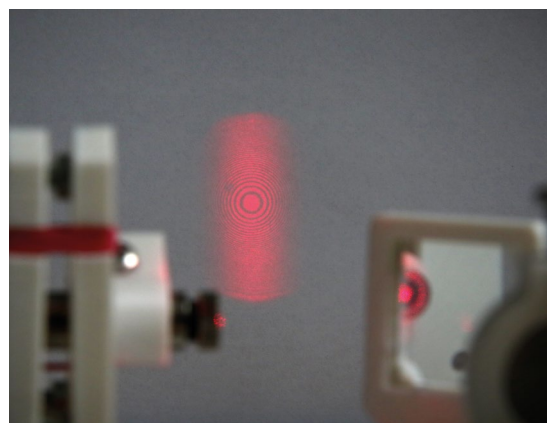
Zpomalené vibrace

Pro interferometr problémové vibrace mohou být i studovány. Ze zpomalených záběrů lze po jednoduchých výpočtech a úvahách vyvodit řadu zajímavých závěrů. Jednotlivé kmity začínají být zřetelné při zhruba pětinašobném zpomalení, ale ideální je snížit rychlost i více než dvacetinašobně (v našem případě 36x, většina moderních telefonů má pro tento účel specializovaný režim kamery, který výrazně zvýší počet pořízených snímků za sekundu a umožní tedy plynulé zpomalení). Samozřejmě různá prostředí a konstrukce interferometru budou mít vliv na intenzitu i rychlost vibrací.

Na obrazcích se vibrace projevují jako „posuny“ interferenčních proužků. Místa s konstruktivní interferencí (tedy jasné proužky) se mění na destruktivní (tmavé oblasti) a naopak, což vyvolává iluzi pohybu. Ze zpomalených záběrů vyplývá, že se obrazce hýbaly nanejvýš o šířku jedné „světlé čáry“ a jedné „tmavé oblasti“. Docházelo tedy k posunům o jeden řád interferenčního maxima. To odpovídá změně dráhového rozdílu paprsků interferometru o jednu vlnovou délku. Abychom kvantitativně určili pohyby samotných zrcadel, musíme dráhový rozdíl vydělit dvěma – paprsky prochází každým z ramen přístroje dvakrát (tam a zpět). Jakýkoliv pohyb zrcadel má tedy dvojnásobný efekt na samotnou interferenci. Ve finále tak dostáváme záchvěvy o velikosti poloviny vlnové délky použitého světla (resp. čtvrtiny, pokud nás zajímá absolutní výchylka). Pro námi použité světlo (650 nm) to činí zhruba 160 nm.

Přesto tato hodnota neodpovídá reálným pohybům zrcadel, namísto toho ukazuje maximální výchylku pro obě zrcadla dohromady – podobá se spíše situaci, kdy pouze jedno ze zrcadel kmitá s námi vypočtenou amplitudou, zatímco druhé je zcela statické (už vůbec nepočítaje možné záchvěvy děliče paprsků a ostatních komponent). Výsledné viditelné záchvěvy jsou tedy součtem všech kmitů v soustavě. To je pozorovatelné i na zpomalených záběrech, kde je kmitání jednoznačně složené, nikoliv harmonické.

Tyto výpočty lze aplikovat nejen pro poměrně nestabilní LEGO interferometr, nýbrž i pro úspěšnějšího následovníka. Pokud je celá 3D tištěná soustava připevněná ke kovové desce či jiné, velmi pevné podložce, lze pozorovat pomalý pohyb kroužků při zatlačení



Obr. 17 Výsledný obrazec 3D tištěného interferometru.



Obr. 18 QR kód odkazující na program simulátoru a soubory k 3D tisku [8].

na jeden roh desky. Její nepatrné prohnutí, zesílené pákou modulů, způsobí opět změnu délky dráhy světla, se kterou můžeme provádět obdobné výpočty. Stejně změny se dá dosáhnout i ohrátím jedné části desky, a zviditelnit tak jev tepelné roztažnosti kovů.

Oba interferometry tedy neslouží pouze jako ukázka interference. Naopak pomáhají seznamovat s řadou dalších jevů. Od šíření mechanických vibrací, přes pevnost materiálů a tepelnou roztažnost, až po fungování jeho samotných komponent. Jsou tedy nejen

vhodnou demonstrací známého Michelsonova experimentu, nýbrž i názornou a všestrannou učební pomůckou.

Literatura

- [1] Školní vzdělávací program pro gymnaziální vzdělávání ve čtyřletém oboru gymnázia a vyšším stupni víceletého oboru gymnázia [cit. 19. 8. 2020]. Dostupné online: <http://www.gymspit.cz/index.php?page=dokumenty>
- [2] S. Gottwald: *Pokusy z fyziky na CD*. In: Veletrh nápadů učitelů fyziky 9, Brno 2004.
- [3] S. Gottwald: *Pokusy z fyziky na CD II*. In: Veletrh nápadů učitelů fyziky 11, Olomouc 2006.
- [4] M. Lázníčka: *Balistika a její demonstrace v praxi*. In: Veletrh nápadů učitelů fyziky 24, Hradec Králové 2019. [cit. 27.5.2021]. Dostupné online: [https://vnuf.cz/sbornik/rocniky/Veletrh_24_\(Hradec_Kralove_2019\).pdf](https://vnuf.cz/sbornik/rocniky/Veletrh_24_(Hradec_Kralove_2019).pdf)
- [5] J. Jandus, V. Železný: *LEGO-LIGO a její demonstrace v praxi*. In: Veletrh nápadů učitelů fyziky 25, Praha 2020.
- [6] Universität Osnabrück – Myphotonics: *Michelson Interferometer Build From LEGO(R) Bricks* (11.11.2020). [cit. 11.04.2021]. Příslušné stránky univerzity a návod k sestavení: <http://www.myphotonics.eu/> <https://www.instructables.com/Michelson-Interferometer-build-from-LEGOR-bricks/>
- [7] S'Cool LAB CERN: *3D-printable Laserlab* [cit. 27.5.2021]. Dostupné online: <https://scoollab.web.cern.ch/laserlab3D>
- [8] J. Jandus, V. Železný: *Odkaz na soubory simulátoru, soubory k 3D tisku a k sestavení jednoduchého LEGO držáku zrcadel* (2020). [cit. 27.4.2021]. Dostupné online: <https://drive.google.com/drive/folders/1IfBxRkx811PIHWsv8T0eQFZIE-8XOee5>