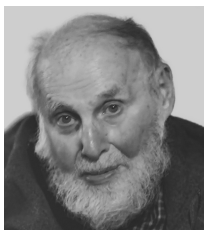




Výfučtení: Arthur Ashkin

Jméno Arthur Ashkin jsme mohli v nedávné době zaslechnout v médiích, ve spojitosti s Nobelovou cenou za fyziku. Tento 96letý fyzik je nejstarší držitel této ceny vůbec. Zasloužil se o ni díky tzv. optickým pinzetám, kterými se budeme zabývat později.



Obr. 1: A. Ashkin v roce 2018. Foto: Bengt Nyman, licence: CC-BY-2.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/deed.en>)

Ashkin se narodil v Brooklynu roku 1922, do ukrajinsko-židovské rodiny. Jeho o dva roky starší bratr Julius byl také fyzik a pracoval třeba na projektu Manhattan, který dal spojencům za druhé světové války první nukleární zbraň. Arthur se po ukončení střední školy vydal na Kolumbijskou univerzitu, kde pracoval v tamních laboratořích. Díky jeho činům byly už tehdy tři jeho kolegové nominováni na Nobelovu cenu. V roce 1947 zamířil na Cornellovu univerzitu, kde se díky svému bratrovi seznámil např. s Richardem Feynmanem.

Po dostudování se rozhodl pracovat v Bellových laboratořích,¹ kde zůstal až do roku 1992. Při své 40leté kariéře získal 47 patentů, převážně z optické fyziky. A o té si teď něco řekneme.

Jak vzniká laserový paprsek?

Laser v překladu znamená „zesilování světla stimulovanou emisí záření“² Tento složitě vypadaající název se dá docela jednoduše vysvětlit. K tomu se ale musíme seznámit se dvěma částicemi: elektrony a fotony.

Elektrony najdeme v atomech – tvoří je společně s protony a neutrony. Zatímco však relativně těžké protony a neutrony sídlí v jádře atomu, téměř 2000krát lehčí elektrony se pohybují v okolí tohoto jádra. Jak již název napovídá, elektrony zároveň přenášejí elektrický náboj v kovech, polovodičích (které jsou např. v počítačích) a při výbojích v plynech a ve vakuu. Velikost náboje jednoho elektronu se označuje jako elementární náboj (je to ten nejmenší možný náboj) a jeho hodnota je $e \doteq 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (C označuje coulomb (ampér-krát-sekunda), jednotku elektrického náboje. Pro představu je 1 C elektrický náboj, který projde 20wattovou, do zásuvky zapojenou zářivkou, zhruba každých 11 sekund.)

¹Bellovy laboratoře jsou slavným výzkumným a vývojovým centrem, založeným roku 1925 významnými americkými elektrotechnickými a telekomunikačními společnostmi AT&T a Western Electric, a které mají po světě řadu center. Z práce jejich zaměstnanců můžeme jmenovat mnohé známé vynálezy, jako jsou tranzistor, laser, radioteleskop nebo třeba programovací jazyk C.

²Samotné slovo laser je anglická zkratka a znamená toto: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

Naproti tomu foton atomy netvoří. Jedná se o částici světla, proto se i rychlostí světla pohybuje. Sám o sobě nemá elektrický náboj, ani hmotnost, pouze hybnost a s ní spojenou energii. Fotony se tedy chovají jako jakési balíčky energie roznášené rychlostí světla. Pro podrobnější vysvětlení vlastností světla se odkažme na druhé Výfuctění tohoto ročníku o Maxu Planckovi (http://vyfuk.mff.cuni.cz/_media/ulohy/r8/vyfucteni/vyfucteni_2.pdf), kde je v oddíle *Elektromagnetické záření* popsána nejstručnější představa. Zopakujme si základní vzorečky ze zmíněného textu. Definice vlnové délky

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f},$$

kde f je frekvence vlnění, měřená v Hz, pro kterou samozřejmě platí $f = 1/T$. Energii fotonu můžeme popsat jako

$$E = hf,$$

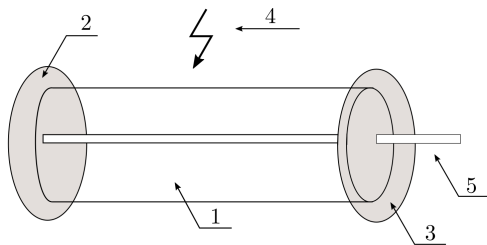
kde $h \doteq 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s je Planckova konstanta. Hybnost fotonu³ můžeme popsat jako

$$p = \frac{E}{c},$$

kde E je jeho energie. Rychlost světla je zhruba $c \doteq 3 \cdot 10^8$ m·s⁻¹.

Stavba laseru

Lasery povětšinou obsahují rezonátor; ten se skládá z aktivního prostředí (1) (může jím být například rubín, safír, xenon, nebo třeba oxid uhlíčitý), jednoho odrazného (2) a jednoho polopropustného zrcadla (3) a zdroje energie (4). Výsledkem je pak samotný paprsek (5). Celý přístroj vypadá přibližně takto:



Elektrony se nacházejí v aktivním prostředí. Přes zdroj jim dodáme energii, (např. výbojkou – to je jiný zdroj světla o přesně požadované vlnové délce). Tím dojde k tzv. excitaci – elektrony v atomech aktivního prostředí přijmou energii z fotonů ze zdroje na ně dopadajících. Tuto energii jsou schopny později zase vyzářit za opětovného vzniku fotonů stejné vlnové délky.

Tímto způsobem excitujeme většinu elektronů v prostředí. Ty však v tomto stavu nejsou stabilní, a tak se ve velmi krátkém čase vrací zpět do základní energetické hladiny (každý elektron má svou danou základní hladinu energie, ke které se excitace přičítají), a tím zpět vyzarují energii ve formě nových fotonů, které následně „vráží“ do dalších elektronů, a znovu u nich spouštějí onu excitaci. Tato řetězová reakce tak stále běží, dokud nemáme dostatek fotonů

³ Pro připomenutí; hybnost se počítá jako součin hmotnosti tělesa a jeho rychlosti.

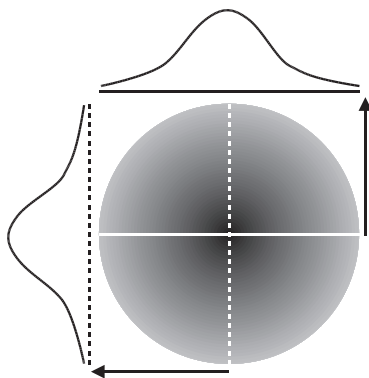
k vytvoření světelného svazku, který pak může prostoupit skrz polopropustné zrcadlo, a který vidíme jako laserový paprsek. Zrcadlo však nesmí být příliš propustné, aby byl v aktivním prostředí dostatek fotonů jak pro světelný svazek, tak i na udržení procesu v chodu.

Akce, reakce a rozptyl a tlak světla

Největší předností laseru je, že vytváří záření stálé vlnové délky a může nám posloužit jako stálý zdroj jednobarevných fotonů. Abychom se však přiblížili k popisu toho, co bylo úspěchem Ashkinovy teorie a experimentu, musíme se na lasery podívat podrobněji.

Pokud uvažujeme samostatný laserový paprsek, který se nekříží s žádným dalším a ani nenařazí na žádné překážky, má smysl mluvit o tom, jaký celkový výkon na jednotku plochy $W \cdot m^{-2}$ můžeme v jeho svazku naměřit. Této veličině říkáme *intenzita světla* I a obecně je v každém bodě paprsku jiná.

Ideální laser s válcovitým rezonátorem nemá intenzitu paprsku všude rovnoměrnou, nýbrž je silnější ve středu a slabší k okraji tak, jako na obrázku 2.



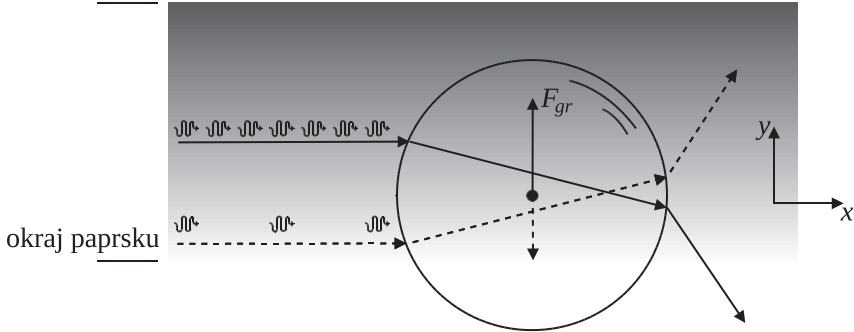
Obr. 2: Intenzitní profil laserového paprsku. Když paprskem procházíme od kraje ke kraji, dostáváme zobrazené funkce. Pro zájemce můžeme prozradit, že se jedná o Gaussovy funkce, přičemž Ashkinovy lasery byly zelené s vlnovou délkou 514,5 nm (argon).

To jinými slovy znamená, že ve středu paprsku proudí mnohem více fotonů než u kraje, a přitom se všechny pohybují jedním směrem rovnoběžně. Jak jsme si již řekli – fotony nesou hybnost. S hybností máme spojený třetí Newtonův zákon akce a reakce. Už v úloze k Výfuktení z 2. série jste si mohli spočítat tlakovou sílu, kterou působí tepelné fotony dopadající na hliníkovou desku. Newtonovy zákony však platí i pro fotony světla, které se láme a proniká skrz průhledný materiál. Světelný paprsek zalomený například kusem skla tomuto sklu předává velmi malou hybnost na jednu stranu s každým fotonem, který je zalomen na stranu druhou. Zároveň na sklo vyvíjí tlak ve směru dopadu původního paprsku, protože s lomem je zmenšena složka hybnosti rovnoběžná s původním paprskem.

Ashkinovi se podařilo tento jev využít. Světelné fotony mají dostatek hybnosti, aby se dal její přenos z nich na mikroskopické částičky umístěné do laserového paprsku použít k manipulaci s nimi – mohly jimi být viry, molekuly, orgány buněk, ale i celé bakterie či krystaly. Na obrázku 3 můžete vidět, jak tato technika funguje pro částice větší, než je vlnová délka

světla (u nich je možno uvažovat šíření paprsků menších, než jsou samy), tj. o velikosti řádově 1 mikrometr a větší.

střed paprsku



Obr. 3: V paprsku šířícím se ve směru $+x$ je umístěna obecná průhledná kulička. Použit lze jakákoli tělesa průhledná pro zvolenou vlnovou délku světla. Ukázalo se totiž experimentálně, že nemusejí být ani kulová.

Kulička není umístěna do středu paprsku, a tak na její horní část dopadá mnohem více fotonů, než na její dolní část. V kuličce se však láme světlo dvakrát, a dohromady se zalomí tak, že po opuštění kuličky pokračuje směrem na opačnou stranu, než na kterou pro kuličku dopadlo. U paprsku s vyšší souřadnicí y vidíme, že paprsek získává hybnostní složku ve směru $-y$, zatímco má zmenšenu původní vodorovnou složku v x (rychlost světla – velikost šipky se nemění). To znamená, že paprsek předává kuličce hybnost ve směru $+y$. Předává jí také hybnost ve směru $+x$, kterou zde nezakreslujeme – tento příspěvek společně s pohlcením fotonů v materiálu kuličky také přispívá k tlaku ve směru x , který je nejsilnější uprostřed laserového paprsku.

Vraťme se však k příspěvkům v ose y . Je snadné rozmyslet, že stále silnější příspěvky budou pocházet od fotonů blíže ke středu paprsku. Z toho plyne vznik tzv. *gradientní síly* F_{gr} , která *přitahuje průhlednou kuličku ke středu paprsku*. Tento jev se také dá zobecnit tvrzením, že *kulička je přitahována do oblasti vyšší intenzity světla*. Pokud bychom laserový paprsek ještě zaostřili do jednoho bodu čočkou, takže by měl maximum intenzity nejen v y , ale také v x , mohli bychom tak vytvořit slavnou *optickou pinzetu*, ve které je částice zachycena a držena světelným tlakem ze všech stran.

Po uchycení částice do ohniska pak celé zařízení může fungovat opravdu jako pinzeta. Když budeme laserem pohybovat, spolu s tím budeme pohybovat i zachyceným objektem.

Velké možnosti

Jak už bylo zmíněno, správně nastavená optická pinzeta funguje i pro částice mnohem menší, než je vlnová délka světla (např. viry, atomy, molekuly) – pak je však jeho vysvětlení mnohem složitější a vyžaduje úplné porozumění chování elektromagnetického pole. Ve svém článku⁴

⁴ASHKIN., A., DZIEDZIC, J. M., BJORKHOLM, J. E., CHU, S. *Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles*. Optics Letters, 11(5), 288. <https://doi.org/10.1364/OL.11.000288>

z roku 1986 uvádí Ashkin se svými spolupracovníky vzorec pro optický tlak na takto malé částice (ve směru šíření paprsku) ve tvaru:

$$F_x = \frac{I_0 r^6}{\lambda^4} K,$$

kde I_0 je intenzita paprsku (řekněme ve středu částice, je-li symetrická), r je *poloměr* částice a λ je opět vlnová délka. Do konstanty K , která má jednotky sekundy na metr ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$) nyní schováváme všechny ostatní členy, které ve vzorci také vystupují ve složitější závislosti na rychlosti světla a prostředích, ze kterých je částice a její okolí. Pro K si tedy můžeme vytvořit i určitou tabulku. Abychom však trochu šetřili místem, uveďme si jen pro příklad pár přibližných hodnot: $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ pro kapičku vody ve vzduchu, $3,8 \cdot 10^{-6} \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ pro sklo na vzduchu, nebo třeba $7,8 \cdot 10^{-9} \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ pro led ve vodě.

Pokud laser postavíme tak, aby svítil zespoda proti gravitační síle, může sloužit také jako *levitátor*. S ním můžeme zvednout částice z průhledné podložky a umístit je třeba do ohniska optické pinzety. Takováto sestava se často používá při experimentech, kde se tato technologie aplikuje už i v úplně jiných oborech, než je fyzika.

Závěr

Optické pinzety dnes našly využití v mnoha oborech a daleko přesáhly zdi fyzikálních laboratoří, kde byly jejich principy fungování poprvé ověřeny. S levným vybavením je možné je i podomácku vyrobit, a existuje řada dodavatelů, kteří i u nás prodávají profesionální přístroje. Základní a nejbohatší aplikací tohoto výzkumu je biofyzika. S pinzetami máme přímočarý způsob, jak mechanicky testovat membrány či orgány živých buněk, aniž bychom je jakkoli poškodili. Nejen že jde o stále velmi zkoumanou oblast, ale je takto možné už dokonce odhalit některé nemoci, které se na manipulovaných buňkách projevují. Potom můžeme také lépe pracovat s bublinkami v kapalinách, efektivně připravit některé chemické reakce či realizovat do té doby velmi obtížné nanotechnologie.

Druhá polovina loňské Nobelovy ceny putovala ke Gérardu Mourou a Donně Stricklandové, a to rovněž za průkopnickou práci v optice. Konkrétně za vynález techniky CPA, která umožňuje obrovsky zesilovat laserové svazky bez toho, aby zničily optickou soustavu, která je přenáší. Zjednodušeně řečeno se původní velmi krátký laserový pulz rozloží na barevné složky, a sníží se mu tak maximální výkon. Takto rozložený pulz je možné maximálně zesílit také, a následně jej opětovně složit ve velmi krátký pulz, který však svým výkonem ohromně převyšuje původní. Tato technologie zase nachází využití v řadě experimentů od biochemie až po jadernou fyziku, i když původně byla navržena pro zvýšení výkonu radarů, které pracují v úplně jiné oblasti elektromagnetického spektra.

Miroslav Jarý

Jason@vyfuk.mff.cuni.cz

Daniel Slezák

dans@vyfuk.mff.cuni.cz

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.