

Světelné víry

Cesta singulární optiky k novým poznatkům a aplikacím

ZDENĚK BOUCHAL

Od teoretického výzkumu k rotoru poháněnému „světelným větrem“

Víry vznikají ve volné přírodě přirozeným způsobem a vyskytují se v rozmanitých formách. Máme zkušenosti s víry způsobenými prouděním hydrodynamickým a atmosférickým – na vlastní oči vidáme jejich účinky, někdy i ničivé. Ve srovnání s nimi jsou projevy světelných vírů mnohem méně zřetelné, a navíc se poněkud vymykají našim představám.

Patrně nejstarší vědecký popis vírových struktur pochází z r. 1930 od Williama Whewella. Tento matematik se zabýval dmutím oceánu a dospěl k závěru, že musí existovat místo, kde se vlny setkávají, přecházejí v rotační pohyb a vytvářejí vír, v jehož centru je výška dmutí nulová. Dnes se více pozornosti věnuje jevům, které souvisejí s víry elektromagnetickými, především světelnými, a s víry svazků hmotných částic (atomů) studovaných v Boseových-Einsteinových kondenzátech.¹ Studium těchto jevů je významné nejen pro hlubší pochopení základních fyzikálních zákonů, ale i pro nové fyzikální a technické aplikace. Zatímco mechanické účinky hydrodynamických a atmosférických vírů jsou snadno pozorovatelné jako vodní či vzdušné víry, popř. tornáda (viz Vesmír 78, 557, 1999/10), na pozorování

světelných vírů naše smysly nestačí, a proto je třeba hledat důmyslnější prostředky.

Umíme si představit světelný vír?

Fyzikální podstatu světelných vírů si můžeme přiblížit s využitím základních pojmů elektromagnetizmu. Elektromagnetické záření, tedy i světlo, souvisí s neustálými, vzájemně provázanými změnami elektrického a magnetického pole. Změny se dějí nejen v čase, ale i v jednotlivých bodech prostoru zaplněného světlem. Pomocí silových účinků elektrického a magnetického pole jsou definovány veličiny vhodné k jejich popisu – *elektrická intenzita* a *magnetická indukce*. Jsou to veličiny vektorové (v daném bodě prostoru a v daném čase mají určitou velikost a definovaný směr). V souvislosti s periodickými prostorovými a časovými změnami těchto veličin mluvíme o kmitech elektrického a magnetického pole. Znázornit lze změny elektrické intenzity v tomtéž čase, ale v různých bodech prostoru (obr. 1). Podobnou situaci si můžeme představit pro jediný bod prostoru, jestliže sledujeme časovou změnu intenzity elektrického pole. Velikost elektrické intenzity prochází v prostoru a čase různými fázemi a rozhodující význam má její maximální hodnota – *amplituda*. Body, ve kterých je změna elektrické intenzity ve stejné fázi, vytvářejí *vlnoplochy* (též *fázové plochy*). Prostorový a časový vývoj elektromagnetických vln se řídí vlnovou rovnicí, kterou lze získat z rovnic Maxwellových. Tradiční řešení této rovnice poskytovala vlny, jejichž vlnoplochy byly spojitě (nespojitosťi byly považovány za „místa, v nichž selhal popis“). Nespojitosti fázových ploch jsou důležitou vlastností světelných vln; nespojitosti světelných vírů jsou bodové. Vlnoplocha (plocha, v jejíchž bodech je elektrická intenzita ve stejné fázi kmitu) pro typické světelné svazky obsahující světelné víry (viz obr. na s. 122 vlevo nahoře) je šroubovitá. Můžeme si ji před-

Doc. RNDr. Zdeněk Bouchal, Dr., (*1958) studoval optiku na PřF Univerzity Palackého v Olomouci a postgraduálně numerické metody na VUT v Brně a MFF UK v Praze. Na katedře optiky PřF UP Olomouc se věnuje optické fázové konjugaci, šíření nedifrakčních svazků a pulzů a světelným vírům.

CO JE TO VLASTNĚ SVĚTLO?

Tuto otázku si kladli již dávní filozofové. Zpočátku se domnívali, že světlo souvisí s něčím, co vychází ven z oka a ohmatává okolní prostředí. S touto myšlenkou vystoupil Empedokles v 5. st. př. n. l. a až do konce 1. tisíciletí n. l. nebyla vážně zpochybněna. Prvním, kdo výrazně překonal názory starých Řeků, byl arabský učenec Abú Alí-Hasan ibn al-Chajtám, v Evropě známý jako Alhazen. Ten již rozpoznal, že vidění není výsledkem světla vycházejícího z oka, ale naopak světla, které do oka vstupuje zvenčí. Výsledky svého bádání shromáždil v knize, která byla přeložena do latiny jako *Opticae thesaurus* (Poklad optiky) a výrazně ovlivnila myslitele mnoha generací. Při formování názorů na podstatu světla se stala významným mezníkem práce Isaaca Newtona, který se přiklonil k názoru, že se světlo skládá z proudu částic (korpusek), jež se přemísťují nepředstavitelně vysokou rychlostí. Vzhledem k neochvějně Newtonově pozici byla jeho teorie dlouho přijímána jako jediná správná, i když již existovala vlnová teorie světla holandského fyzika Christiaana Huygense, která vysvětlovala řadu optických jevů. První experimentální důkaz toho, že se světlo šíří jako vlna, podal italský fyzik Francesco Grimaldi. Zkoumal průnik slunečního světla malými otvory a objevil jeho ohyb. Tento jev nazval *difrakce*. Argumentem ve prospěch vlnové teorie světla se staly

experimenty anglického fyzika Thomase Younga, který se zabýval skládáním světla procházejícího dvěma úzkými štěrbinami. Ani tyto výsledky ještě nebyly považovány za přesvědčivý důkaz vlnové podstaty světla. Plně akceptována byla vlnová teorie teprve po experimentálním ověření teoretických prací Augustina Fresnela o difrakci světla. Vysvětlit podstatu světelných vln se však podařilo až Fresnelovu následníkovi, skotskému fyzikovi Jamesi Clerku Maxwellovi. Své práce založil na experimentálních poznatcích elektřiny a magnetizmu. Vše, co bylo v této oblasti známé, pak shrnul do čtyř rovnic, které dnes nesou jeho jméno. Jedním z hlavních výsledků jeho teorie bylo poznání, že světlo není nic jiného než elektromagnetické vlnění. Tento poznatek znamenal sjednocení popisu a výkladu jevů optických s jevy elektromagnetickými. Klasická elektrodynamika byla završena pracemi v oblasti pohyblivých prostředí, jejichž výsledky interpretoval Albert Einstein ve speciální teorii relativity. Současná kvantová epocha elektrodynamiky začala objevem nespojitého, diskrétního charakteru světla, pro jehož elementární kvantum zavedl Einstein pojem *foton*. Má-li být chování světla plně objasněno, je nutné připustit dualitu vln a částic. V tomto přístupu má foton vlastnosti jak vlnové, tak částicové. Které z nich nám ukáže, to bude záležet na experimentální situaci, v níž se objeví. Z.B.

stavit jako spirálovité věžní schodiště – na osách šroubovic se hodnota fáze skokově mění a není jednoznačně určena. Dá se ukázat, že v bodech, ve kterých se optické víry objevují, nabývá amplituda vlny nulové hodnoty (světlo v těchto bodech vyhasíná a vlna tmavne). Důležitým parametrem světelného víru je celočíselný topologický náboj m ,² který v názorné představě určuje počet listů šroubovic, jimiž je vlnoplocha tvořena.

Identifikace světelných vírů

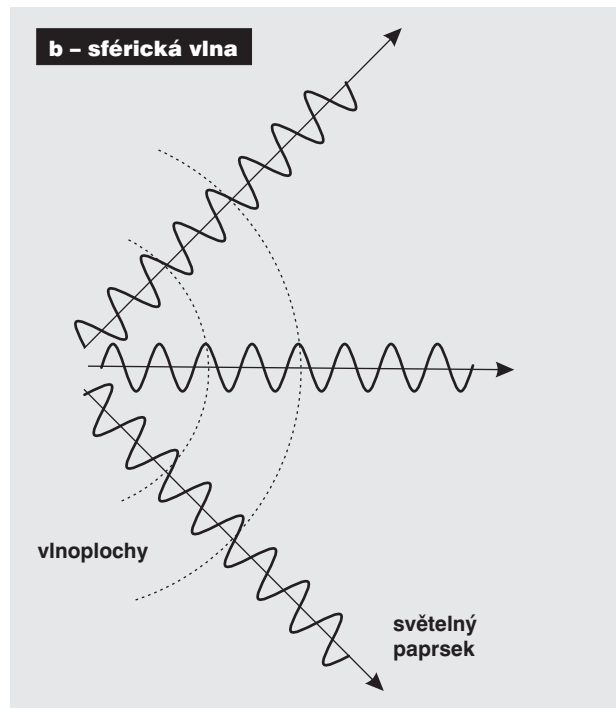
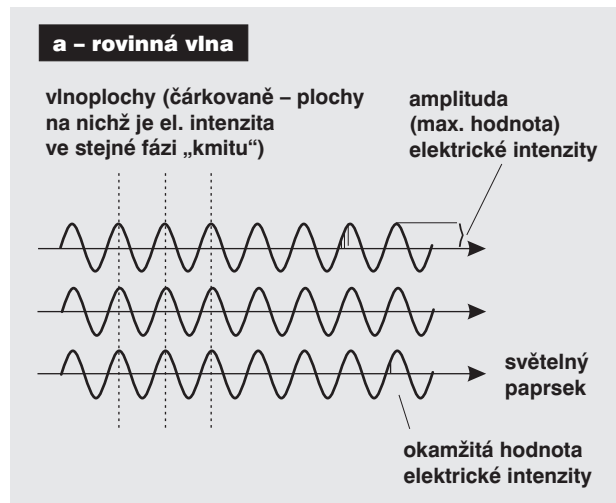
Světelné víry mohou vzniknout nahodilým způsobem, například složením (interferencí) náhodně rozptýleného světla. Pozornost je však zaměřena hlavně na světelné víry, které jsou záměrně vytvářeny v dobře směřovaných optických svazcích. Pro praktické využití jsou nejvýznamnější svazky koherentního záření generované lasery. Nejobvyklejším typem svazku opouštějícím rezonátor laseru je gaussovský svazek, který vytváří rotačně symetrickou světelnou stopu. Takový svazek je nejsvětlejší na ose a s přibývajícím vzdáleností od osy jeho intenzita (v souladu s Gaussovou funkcí) klesá. Stopa svazku se rozšiřuje, avšak gaussovský profil zůstává zachován. Vlnoplochy takového svazku jsou ve všech bodech spojitě. Na pozadí laserového svazku lze speciálními metodami vytvářet víry, které vykazují neobvyklé chování a mohou být využity k modulaci světelného signálu při přenosu informace.

Jakým lze světelné víry pozorovat

Vírová struktura je nejlépe patrná ze šroubovitě tvaru fázové plochy, ale při přímém pozorování světelných svazků nebo při jejich registraci detektory reagujícími na amplitudu (resp. intenzitu) světla se informace o fázi svazku ztrácí. Fázovou plochu světelného svazku nelze vyhodnotit přímo, u koherentních světelných svazků (např. laserových) ji však vyhodnotíme nepřímou, jestliže zkoumaný svazek složíme se svazkem pomocným (referenčním). Kromě konstruktivní interference, při které světlo zesílí, může nastat interference destruktivní, která probíhá podle vzorce: *světlo + světlo = tma* (v místě, kde by každá z vln samostatně způsobila osvětlení, může být při jejich současném působení tma). Stane se to tehdy, jestliže se skládají vlny o stejné amplitudě sejdou

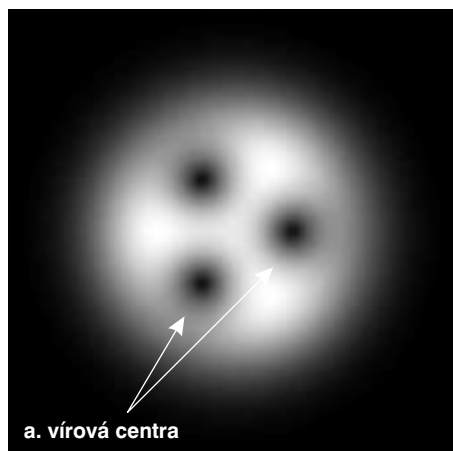
1) Boseovy-Einsteinovy kondenzáty jsou stavem látky, ve kterém makroskopický počet částic sdílí tentýž kvantový stav. Základní ideu podali již před více než 75 lety fyzikové S. N. Bose a A. Einstein, kteří pracovali s představou zředěného plynu o teplotě blízké absolutní nule. V laboratořích byly Boseovy-Einsteinovy kondenzáty připraveny r. 1995 a r. 2001 byla za experimentální práce v této oblasti udělena Nobelova cena za fyziku.

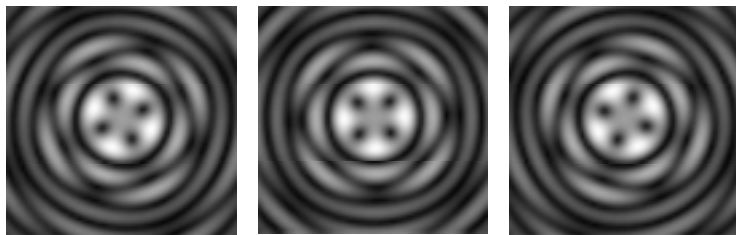
2) Matematicky lze topologický náboj definovat pomocí cirkulace gradientu skalární funkce popisující fázi vlny.



1. Vlnoplochy světelné (elektromagnetické) vlny. V bodech vlnoplochy je elektrická intenzita vlny ve stejné fázi kmitu. Vlnoplocha je potom definovaná jako plocha konstantní fáze. Ve speciálních případech dostáváme vlnu s rovinnými vlnoplochy (a) nebo se sférickými vlnoplochy (b).

2. Víry „uhnžděné“ v laserovém svazku. Za běžných podmínek trojice světelných vírů stejného topologického náboje nemění vzájemnou polohu a při šíření pouze expanduje společně s nosným laserovým svazkem (a). Zviditelnění vírové struktury lze provést složením s rovinnou referenční vlnou (b) nebo se sférickou vlnou (c).





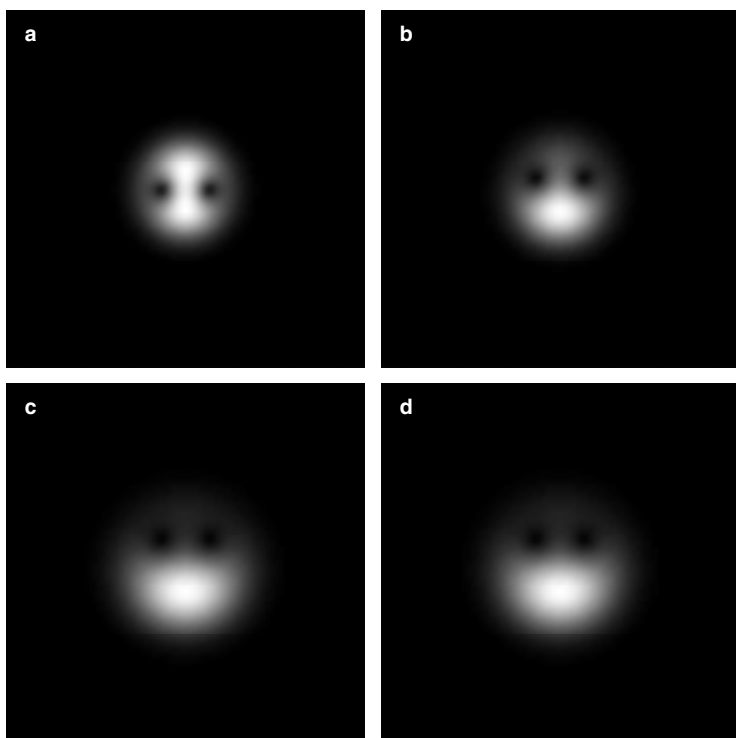
3. Rotující vírová struktura. Vírová struktura může při volném šíření měnit svoji pozici. Jednou z možných změn je její rotace.

s opačnou fází (odečtou se). Právě interference je dobrým prostředkem k zviditelnění optických vírů. Šroubovitý tvar fázové plochy v okolí světelného víru může být demonstrován, jestliže složíme vírový svazek s referenčním, jímž je nejčastěji sférická nebo rovinná vlna (obr. na s. 122 nahoře vpravo). Interferenční vzory, které dokládají přítomnost víru, mají v prvním případě spirálovitý tvar, v druhém typické vidličkovité rozštěpení. Podle počtu větví spirál můžeme rozpoznat velikost topologického náboje příslušného víru.

Neobvyklé projevy světelných vírů

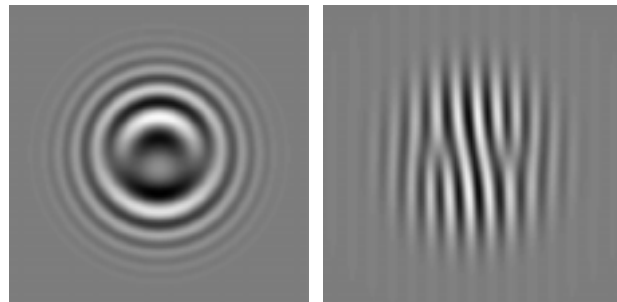
Světelné víry „uhnížděné“ v běžném laserovém svazku mohou mít různé projevy v závislosti na tom, jak byly vytvořeny. Nejběžnější je, že se vzájemně rozmístění vírů ve svazku při šíření volným prostorem tvarově nemění a vytvořený vzor se rozšiřuje v souladu s rozšiřováním nosného svazku (obr. 2). Dalším možným režimem vývoje optických vírů při volném šíření prostorem je jejich plynulá rotace na pozadí nosného svazku (obr. 3). Kromě případu, kdy se na předem definované konečné vzdálenosti otočí struktura vírů o úhel 2π , je možná i rotace, při níž by k témuž otočení došlo na vzdálenosti velmi velké (popř. nekonečné). Patrně nejzajímavějším chováním optických vírů je jejich vzájemné odpuzování a přitahování. V analogii s elektrostatikou toto chování vykazují dvojice vírů stejné nebo opačné „polarity“. Jestliže má pár vírů opačný topologický náboj, při šíření volným

4. Přitahování optických vírů. Při volném šíření se světelné víry stejného topologického náboje odpuzují. V případě opačné „polarity“ světelných vírů (opačného topologického náboje) dochází k jejich přitahování (a–c), které může končit vzájemným pohlcením (d).



prostorem se intenzivně přitahují, což může skončit i vzájemným pohlcením (obr. 4). Opačná polarita se ve výchozí pozici pozná podle toho, že se spirály interferenčního obrazce stáčí proti sobě a vidličkovitá rozštěpení mají opačnou orientaci (obr. 5).

V posledním období se věnuje pozornost světelným vírům „uhnížděným“ v nedifrakčním nosném svazku. Ten se na rozdíl od běžného laserového svazku při volném šíření téměř nerozpíná (nevykazuje difrakci), jeho stopa zachovává nezměněný tvar a velikost i při značných vzdálenostech. Takové svazky jsou mimořádně stabilní. Teoreticky i experimentálně bylo ověřeno,³ že v takovém svazku vznikne stín jen



5. Zviditelnění dvojice vírů opačného topologického náboje. Ve výchozí pozici, kde jsou vírová centra prostorově separována, je opačná „polarita“ vírů dobře zřejmá z opačného stoupání spirál a opačné orientace vidličkovitých rozštěpení.

těsně za překážkou a o kus dál se svazek samovolně obnoví (obr. 6.). Podélná světelná stopa se vrátí do původní podoby (obr. 7).

Mechanické účinky vířícího světla

Světelné víry byly dosud demonstrovány jako tmavá místa světelného pole, kolem nichž se vytváří šroubovitá fázová plocha. V hydrodynamice mluvíme o vírech v souvislosti s rotačním vířivým pohybem kapaliny, který má zřejmé mechanické účinky. Vířivému proudění kapaliny odpovídá u světelných vírů vířivý tok elektromagnetické energie. U světelných vln můžeme pro každý bod prostoru v každém čase určit velikost a směr toku elektromagnetické energie. Jeho hustotu je možné získat přímo ze základních veličin elektromagnetismu – elektrické a magnetické intenzity.⁴ Rovněž se dá prokázat, že ve volném prostoru je směr toku elektromagnetické energie totožný se směrem gradientu fáze vlny. Představme si to tak, že v daném bodě vlnoplochy proudí elektromagnetická energie ve směru určeném vnější normálou vlnoplochy a že normály vlnoploch představují pomyslné paprsky přenášející energii světla. Jestliže si pozorně prohlédneme tvary šroubovitých vlnoploch obklopujících světelné víry, zjistíme, že paprsky představují stoupající spirály a světelná energie, která je jimi přenášena, vytváří energetický vír (obr. 8). S tímto prouděním energie úzce souvisejí mechanické projevy světelných vírů. Nedávno skupina fyziků z Univerzity St. Andrews ve Skotsku zjistila, že světelné vírové svazky vykazují orbitál-

3) Experiment byl proveden v laboratoři RNDr. J. Wagnera na katedře optiky PFF UP Olomouc.

4) Podařilo se to již v 19. století Johnu Henrymu Poyntingovi, který ukázal, že vektor udávající velikost a směr hustoty toku elektromagnetické energie je určen vektorovým součinem elektrické a magnetické intenzity.

5) Teoretické výsledky ukázaly, že normovaný orbitální úhlový moment hybnosti, tj. takový, který přísluší jednomu fotonu vírového svazku o topologickém náboji m , je určen hodnotou $m\hbar$, kde \hbar je redukovaná Planckova konstanta. Mechanický účinek by měl být pozorován jako rotace částic. Tyto předpoklady byly úspěšně testovány v experimentech.

ní úhlový moment hybnosti, který je možné přenést na mikročástice a atomy.⁵

Jak se dá „roztočit“ světlo

Zájmem teoretiků o fyzikální problémy spojené s optickými víry a orbitálním úhlovým momentem hybnosti se nakazili i experimentátoři. V posledním desetiletí byla navržena řada metod, jimiž lze v laserových svazcích vytvářet vírové struktury. Jedna z prvních využívá spirální fázovou masku, která „roztočí“ fázi procházejícího laserového svazku a vytvoří vír elektromagnetické energie (maska byla navržena v Ústavu radiotechniky a elektroniky v Praze). Jiná metoda využívá hologramy generované počítačem, není však vhodná pro práci s laserovými svazky vysokého výkonu. V posledním období se k vytváření světelných vírů nejčastěji užívají astigmatické konvertory, které jsou sestaveny z běžně dostupných válcových čoček.

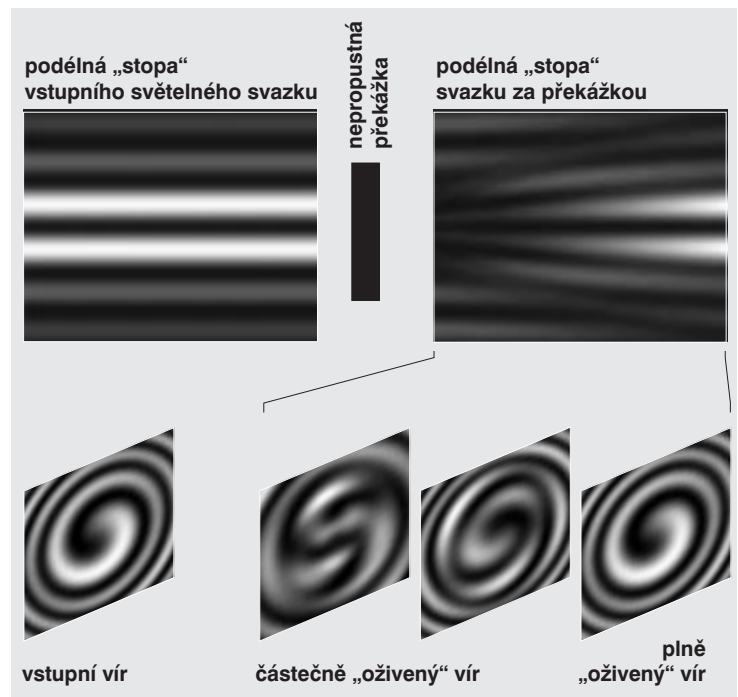
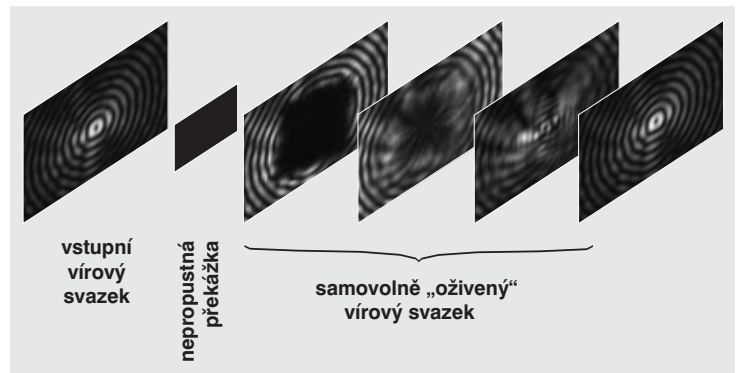
Možnosti využití a pohled do budoucna

Přestože je možné výzkum laserových vírů označit za základní, rýsuje se již možnosti využití. Především jde o pokusy využít mechanické účinky orbitálního momentu hybnosti vírových svazků jako světelný pohon pro mikromechanické systémy. Pohonný rotor, měřící jen několik mikrometrů, připomíná větrník, jehož lopatky zabírají ve „světelném větru“. Podobné mechanické struktury již uskutečnila skupina vědců z Maďarské akademie věd. V experimentech dosáhli rotace několika otáček za sekundu při osvětlení laserovým svazkem o výkonu 20 miliwatů. Tyto optické rotatory byly použity jako účinný neinvazivní nástroj pro studium mechanických vlastností jednotlivých buněk, popřípadě biologických makromolekul. „Duté“ světelné svazky s tmavým vírem na ose se využívají v atomové optice jako potenciálové trubice pro zachycení a vedení chlazených atomů (byly použity také při konstrukci elektronových urychlovačů). Vzhledem k stabilitě vírových polí se očekávají další aplikace v oblastech, které zahrnují optický záznam, přenos a zpracování informace. Výhodný celočíselný topologický náboj optických vírů je novým nástrojem pro topologickou aritmetiku a optické počítače. Nelineárními optickými interakcemi lze topologické náboje svazků ovládat. Například jev, kdy se v nelineárním optickém krystalu dvojnásobně zkrátí vlnová délka vstupního svazku, a tím se změní jeho barva, zároveň umožňuje zdvojnásobit topologický náboj světelného víru. Optické víry také dávají možnost vytvořit světelné stopy vhodné pro vedení světla světlem, tedy „světelné vlnovody“. Světelné víry patří do kategorie polí, která vykazují nespojitosti fázové plochy – *fázové singularity* (v optice již vznikla nová disciplína – *singulární optika*).

Problematika vírových struktur zasahuje do řady fyzikálních odvětví, jako jsou fyzika pevné fáze, částicová fyzika nebo kosmologie. Prognóza dalšího vývoje je obtížná, ale již dnes je zřejmé, že tento směr výzkumu může přispět k lepšímu porozumění přírodním zákonům a jevům a přinést pokrok ve vývoji nových technických prostředků a technologií. □

Výzkum optických vírových polí na katedře optiky PěF UP je podporován projektem LN00A015 MŠMT ČR. Za podnětné připomínky k článku je autor zavázán prof. J. Peřinovi.

8. Vířivý tok elektromagnetické energie. Vířivý pohyb nosného média hydrodynamických a atmosférických vírů má svou analogii i u vírů světelných. V tomto případě dochází k vířivému proudění elektromagnetické energie. Trajektoriemi tohoto vířivého toku jsou pomyslné světelné paprsky.



6. Oživení světelného víru za překážkou nepropouštějící světlo. V experimentu byl světelný svazek s centrálně umístěným vírem zastíněn obdélníkovou překážkou. Ačkoliv je svazek bezprostředně za ní silně porušen, vytvořený stín velmi rychle mizí a svazek se samovolně vrátí do původní polohy. Oživení se týká nejen světelné stopy svazku, ale i topologie fázové plochy související se světelným vírem, který je svazkem nesen.

7. Oživení topologie světelného víru. Vírový svazek porušený překážkou obnovuje nejen svou intenzitu, ale i svou šroubovitou vlnoplochu. Různá stadia její obnovy jsou zřejmá z interferenčních obrazců získaných složením zkoumaného svazku s pomocnou sférickou vlnou. Ve spodní části obrázku je zviditelněn vír nesený svazkem před překážkou, a potom v různých vzdálenostech za ní. Je zřejmé, že se téměř dokonale oživuje topologie víru. Schopnost regenerace světelných svazků byla využita při konstrukci zařízení, která umožňují manipulovat pomocí laserového záření mikročásticemi.

