

# Příběh adaptivní optiky

Jan Pilarš

HILASE centrum, Fyzikální ústav AV ČR, Za Radnicí 828, 252 41 Dolní Břežany; Jan.pilar@hilase.cz

Během posledních třiceti let se adaptivní optika proměnila z vysoce sofistikované, nákladné a utajované technologie v běžnou součást pozemských teleskopů, mikroskopů, laserových systémů či nastupujících systémů pro satelitní komunikaci. Podívejme se na základní principy této revoluční metody a přibližme si její historický vývoj.

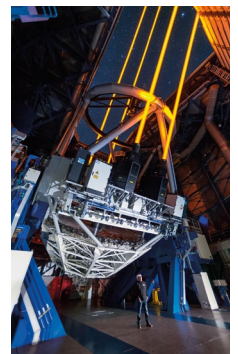
## Motivace pro vznik adaptivní optiky

Myšlenka adaptivní optiky (AO) vzešla z astronomického prostředí a byla poprvé formulována v padesátých letech 20. století americkým astronomem Horacem W. Babcockem – pozdějším ředitelem observatoře Palomar v Kalifornii [1]. Observatoř Palomar je provozována Kalifornským technologickým institutem (Caltech) a jako taková vždy patřila k předním vědeckým observatořím. Od roku 1948 je zde umístěn Haleův teleskop o průměru 200 palců (asi 5 m), který se po uvedení do provozu držel po 27 let na první světové příčce co do velikosti primárního zrcadla a zůstává na předních pozicích dodnes.

Právě pozemské teleskopy velkých rozměrů nejvíce pocítují atmosférické limity pozorování oblohy. Tyto limity nejsou dány technologickým omezením schopnosti výroby velkého primárního zrcadla v patřičné kvalitě, ale především kvalitou pozorovacích podmínek (tzv. astronomický *seeing*)<sup>1</sup>. Kvalita pozorovacích podmínek je dána hlavně mírou chvění atmosféry, ve které se mísí teplý a studený vzduch, a tak vznikají turbulentní proudy v jejích různých vrstvách. Protože index lomu vzduchu je závislý na jeho teplotě a hustotě, je světlo procházející takovou vrstvou turbulentní atmosféry ovlivněno ve smyslu drobných změn ve směru jeho šíření. Pro lidské oko a teleskopy malých rozměrů se tyto drobné náhodné a rychle se měnící změny směru šíření světelného signálu projevují jako jemný a rychlý pohyb objektu, většinou doprovázený stejně rychlými změnami zdánlivé intenzity. Oba jevy jsou souhrnně označovány jako „mihotání“ a je dobře patrné při pohledu pohyblivým okem na jasné hvězdy. Při použití teleskopu s větší aperturou se mihotání do určité míry omezí a turbulence v atmosféře se projeví především jako rozmazání obrazu. Při pohledu na větší ob-

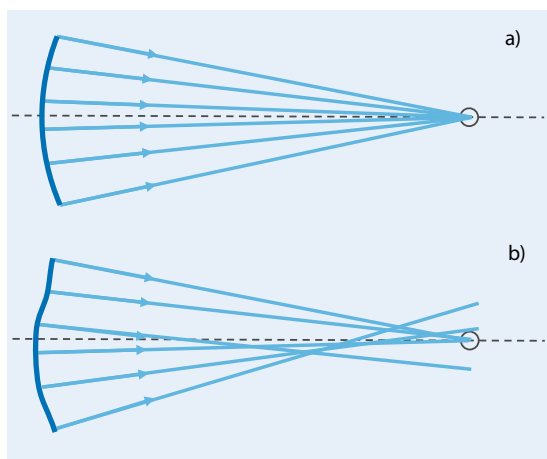
jekty, jako třeba Měsíc, můžeme také pozorovat „teteleň“ obrazu, což znamená, že obraz je zdánlivě rozdělen na dílčí podoblasti, jejichž hranice neustále mění svůj tvar a náhodně se vůči sobě pohybují. Velikost těchto dílčích podoblastí, střední amplituda a rychlost jejich pohybu jsou potom závislé na síle a míře atmosférických turbulencí. Tento jev je také zodpovědný za rozmazání astrofotografických snímků pořízených při delších expozičních časech (nesouvisející s problémem kompenzace otáčení Země). V důsledku je tak rozlišovací schopnost pozemských teleskopů omezena zhruba na úroveň odpovídající teleskopům o apertuře 10–20 cm [2].

Problém vlivu turbulentní atmosféry na kvalitu astronomického pozorování byl v padesátých letech 20. století dobře znám, avšak metody měření těchto vlivů byly teprve formulovány a stejně tak metody kompenzace zhoršených pozorovacích podmínek [3]. V zásadě jsou dva možné způsoby, jak se seeingu alespoň částečně zbavit. První způsob představuje výběr lokality pro vlastní pozorování. Toto bylo zřejmě již dlouho, nicméně teprve s příchodem technik měření seeingu a dalších aspektů ovlivňujících pozorování, bylo možné objektivně porovnat podmínky světových astronomických lokalit a vybrat ty nejvhodnější k výstavbě velkých pozemských observatoří, jež by byly co možná nejméně zatíženy vlivem atmosférických turbulencí. Při výběru vhodné pozorovací oblasti je zapotřebí minimalizovat množství světelného smogu, vybrat oblast s klidným prouděním vzduchu a co možná nejvíce omezit tloušťku husté atmosféry nad pozorovatelem tak, aby bylo světlo hvězd co nejméně ovlivněno průchodem atmosférou (vyšší nadmořská výška). Pokud budeme poslední aspekt výběru pozorovacího místa extrapolovat a umístíme teleskop nad zemskou atmosférou – tedy na oběžnou dráhu Země či hlouběji do vesmírného prostoru – zbavíme se omezení seeingu zcela. Na tuto variantu poukázal již roku 1946 americký fyzik *Lyman Spitzer* a později ji rozvinul v projektu Hubbleova vesmírného teleskopu. Tato možnost je finančně velice náročná a podléhá poměrně přísným technologickým omezením na maximální velikost, hmotnost a mechanickou pevnost vesmírného teleskopu. Na druhou stranu má vesmírný teleskop jiné výhody oproti pozemským, zejména ve smyslu spektrálního rozsahu detekovatelného záření, které není stíněno zemskou



Čtyři umělé laserové hvězdy na teleskopu VLT, v chilském Paranalu. Moderní systémy adaptivní optiky využívají pokročilá schémata řízení a kombinují hned několik senzorů vlnoplochy, fázových korektorů i umělých hvězd. Kredit: ESO/F. Kamphues

1 *Astronomický seeing* by se dal česky nazvat např. jako „jev v atmosféře zhoršující pozorovací podmínky“, což je neprakticky dlouhý termín – proto se používá i mimo angličtinu termín „seeing“. Potíž je trochu s tím, že se za ním mohou skrývat různé způsoby kvantifikace. Jedním ze způsobů je uvádět pološířku profilu intenzity zobrazeného bodového zdroje (hvězdy). Druhá možnost je uvádět *Friedův parametr* – maximální velikost průměru primárního zrcadla (apertury), kdy efekt atmosféry začne výrazně zhoršovat zobrazení optickým systémem. Tedy v prvním případě chceme hodnotu parametru seeingu minimalizovat, ve druhém maximalizovat.



**Obr. 1** Geometrická aproximace tvorby obrazu bodového zdroje při zobrazování a) bez aberací a b) za přítomnosti aberací.

atmosférou, avšak to je již jiná problematika. Druhou možnost, jak se zbavit vlivu turbulentní atmosféry, potom představuje právě adaptivní optika – tedy elektrooptický systém, jenž dokáže vliv atmosférických turbulencí na optickou vlnu měřit a efektivně jej v reálném čase kompenzovat. Právě takový systém popsal Babcock ve svém článku z roku 1953.

### Popis metody adaptivní optiky

Pro vysvětlení funkce adaptivního systému je potřeba si uvědomit, že v ideální optické soustavě pracujeme s optickými vlnami rovinnými a sférickými. Toto je důležité pro dosažení vysokých intenzit v ohnisku laserových svazků, minimalizaci jejich rozbíhavosti či pro optimální zobrazení optickým systémem (například teleskopem). Reálné optické systémy však zpravidla trpí různými vadami a nepřesnostmi, v jejichž důsledku nejsou optické vlny na jejich výstupu zcela rovinné či kulové, ale trpí odchylkami od tohoto ideálního tvaru. Tyto odchylky jsou běžně označovány jako optické aberace a jsou příčinou rozmytí ohniska laserového svazku či rozmazání obrazu v optické soustavě. Vhodnou představu o důvodech tohoto rozmazání můžeme získat z přiblížení geometrické optiky (viz obr. 1). V astronomii je světlo hvězdy přicházející z vesmíru (v důsledku obrovské vzdálenosti jeho zdroje) v podstatě rovinnou elektromagnetickou vlnou. Průchodem atmosférou je však tato rovinnost porušena a do vlny jsou vneseny aberace neboli fázové odchylky od jejího rovinného tvaru. Důsledkem těchto poruch je, že při zobrazení teleskopem je světlo soustředěno na větší oblast obrazové roviny (CCD čip), než kdyby bylo bez poruch, a obraz se proto jeví rozmazaný.

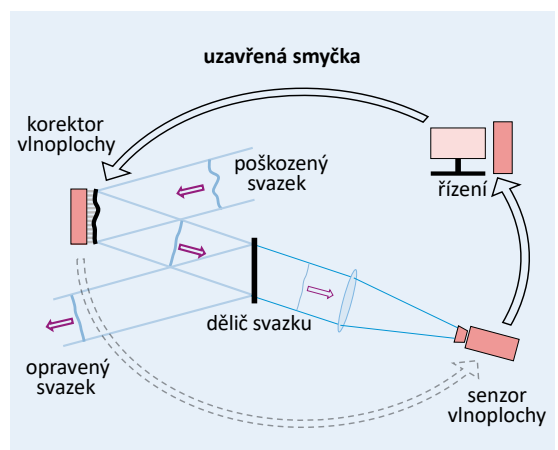
O rovinně vlně můžeme říct, že má rovinnou vlnoplochu. Vlnoplochu je míněn povrch v prostoru, na kterém má daná vlna stejnou fázi. Stejně tak o kulové vlně řekneme, že má fázi kulovou – tvaru části koule. V přiblížení geometrické optiky potom platí, že směr šíření optické vlny je v každém jejím místě kolmý na její vlnoplochu. Pokud vyneseme tyto směry šíření pro ideální konvergentní kulovou vlnu, protnou se tyto v jednom bodě – ohnisku. Když to samé uděláme pro vlnu s porušenou vlnoplochu, některé její části prochází rovinou ohniska jinde než zbývající. To značí současně buďto rozmytí ohniska (a následný úbytek maximální intenzity) či rozmazání obrazu.

<https://ccf.fzu.cz>

Metoda adaptivní optiky předpokládá především užití optického prvku schopného adaptivně ovlivňovat vlnoplochu optické vlny, takzvaného korektoru vlnoplochy. Tento korektor musí být možné ovládat elektronicky tak, aby jej bylo možno přizpůsobit konkrétnímu případu optických vad korigované optické vlny v daný okamžik. Schematický náčrt adaptivně optického systému pro korekci optických aberací je na obrázku 2.

Korektor vlnoplochy je řízen na základě měření optických vad pomocí senzoru vlnoplochy. Tato měření jsou následně zpracována řídicím systémem a je vygenerován řídicí signál pro příslušný korektor vlnoplochy, který zajistí kompenzaci zjištěných aberací. Tento proces se neustále opakuje, iterativně tak zpřesňuje kvalitu opravy aberací a zároveň reaguje na dynamické změny aberací v čase. Hovoříme o uzavřené smyčce či smyčce se zpětnou vazbou, mezi jejíž nesporné výhody patří vysoká robustnost řízení a značná tolerance k nepřesnostem při charakterizaci korektoru. Pro případ kompenzace atmosférických turbulencí musí být opakovací frekvence adaptivní smyčky srovnatelná s rychlostí změn aberací, což pro optické vlny v zemské atmosféře znamená opakovací frekvence v řádu stovek Hz až jednotek kHz. Pro ostatní oblasti použití adaptivní optiky zpravidla postačují nižší opakovací frekvence, někdy je kompenzovaná aberace i statická – v čase neměnná.

Pro adaptivně optický systém ve své původní podobě jsou tedy zapotřebí tři základní komponenty – korektor vlnoplochy, který opravuje vlnoplochu světla tak, aby byly aberace v ní obsažené efektivně eliminovány; senzor vlnoplochy, který měří aberace optické vlny v dostatečné kvalitě a s dostatečnou rychlostí a zajišťuje signál pro zpětnou vazbu korektoru; v neposlední řadě je potom potřeba řídicí systém, který zprostředkovává zpětnou vazbu mezi senzorem vlnoplochy a korektorem vlnoplochy a který má zásadní vliv na výsledné vlastnosti adaptivní smyčky. Všemi třemi komponentami adaptivně optického systému se budeme blíže zabývat v navazujícím článku, kde bude jejich funkce více přiblížena a budou uvedeny konkrétní případy jejich realizace. Obecně pouze uvedme, že problém detek-



**Obr. 2** Schéma principu uzavřené smyčky adaptivní optiky. Část přichozího světla je vydělena pro senzor vlnoplochy, který měří aberace svazku a tuto informaci předává řídicímu prvku. Ten následně upraví korektor vlnoplochy tak, aby zjištěné aberace vlnoplochy opravil. Celý proces se iterativně opakuje, zpřesňuje a reaguje na změny aberací v čase. Opravený svazek je následně zobrazen na vědecké zařízení (CCD čip, spektrometr apod.) a dosahuje typicky řádově lepších rozlišení, než kdyby opravený nebyl.

ce fáze optické vlny není v žádném případě triviální, a to už proto, že veškerá záznamová média, jako je fotografický papír, CCD čip či lidské oko, jsou schopna vnímat pouze kvadrát amplitudy elektrického pole neboli jeho intenzitu. Fázová informace je při takovém procesu vždy ztracena. Pro její získání je třeba využít speciálních detektorů či interferenčních jevů tak, aby se fázová informace stala čitelnou i za použití těchto záznamových médií. Ani vývoj zařízení vhodných pro programovatelné ovlivnění tvaru vlnoplochy nebyl nikterak přímočarý či jednoduchý. Ve své typické podobě nakonec dospěl do podoby tzv. *deformovatelného zrcadla*. To vyžaduje užití velice přesných aktuátorů, které jsou schopny způsobovat drobné změny tvaru zrcadla, na něž jsou připevněny. Do optické vlny, která se od takového deformovatelného zrcadla odrazí, je potom vnesena fázová změna úměrná tvaru povrchu takového zrcadla. Pro naše potřeby se však prozatím spokojíme s výše uvedeným hrubým nastíněním jejich funkce.

### Historický vývoj

Když doktor Babcock poprvé formuloval svou myšlenku aktivní kompenzace atmosférických turbulencí na pozemském teleskopu, představovaly všechny komponenty adaptivního optického systému nedostupnou technologii. Sám Babcock počítal ve svém návrhu s měřením aberací pomocí Foucaultova testu na ostré hraně k získání obrazu sestávajícího ze světlejších a tmavších oblastí, podle toho, jaké by bylo dráhové zpoždění optické vlny přicházející z různých částí primárního zrcadla. Tento obraz měl být zaznamenán televizní kamerou (ikonografem) a jeho analogově zpracovaná obdoba promítána zařízením zvaném *eidophor*, jež používalo tenkou vrstvu oleje nanášenou na odrazné zrcadlo. Olej bylo možné po ploše přesouvat pomocí elektronového zdroje a měnit tak jeho tloušťku v různých místech. Vlivem vyššího indexu lomu oleje oproti vzduchu by byla optická vlna zpožděna v místě, kde byla olejová vrstva silnější, a naopak. Tímto způsobem by bylo docíleno vyhlazení fázového profilu přicházející optické vlny a byl by získán ostrý obraz příslušného objektu. Řídicí systém byl v tomto případě realizován analogově. Ačkoliv byl koncept na bázi eidophoru dobře popsán, nebyl nikdy realizován a možná byl přece jenom za možností tehdejší technologie.

Vývoj v nově vzniklém oboru kompenzace atmosférických turbulencí však byl záhy zásadně ovlivněn jiným objevem, a to sestavením prvního laseru Theodorem Mainmanem roku 1960. V tu chvíli se totiž adaptivní optika dostala do popředí zájmu armády, která v dalších letech vynaložila značné prostředky na její vývoj. Armádní výzkum od počátku vnímal potenciál využití laserového záření pro vývoj zbraňových systémů. Ovšem při šíření laserového svazku atmosférou dochází ke stejnému jevu jako při pozorování oblohy, ne-li horšímu. Variace v hustotě a teplotě vzduchu způsobují deformace vlnoplochy laserového svazku, který pak nelze zacílit na dostatečně malou oblast a tedy dosáhnout potřebných intenzit záření. Naprosto zásadní technologii pro dosažení těchto cílů byla adaptivní optika a její příslib možného odstranění vlivu turbulentní atmosféry. Z těchto důvodů byl v následujících letech hlavní vývoj v oblasti adaptivní optiky realizován převážně v armádních laboratořích a podléhal utajení. Rekonstruovat vývoj příslušných technologií v této době bylo možné až zpětně po odtajnění materiálů na počátku 90. let.

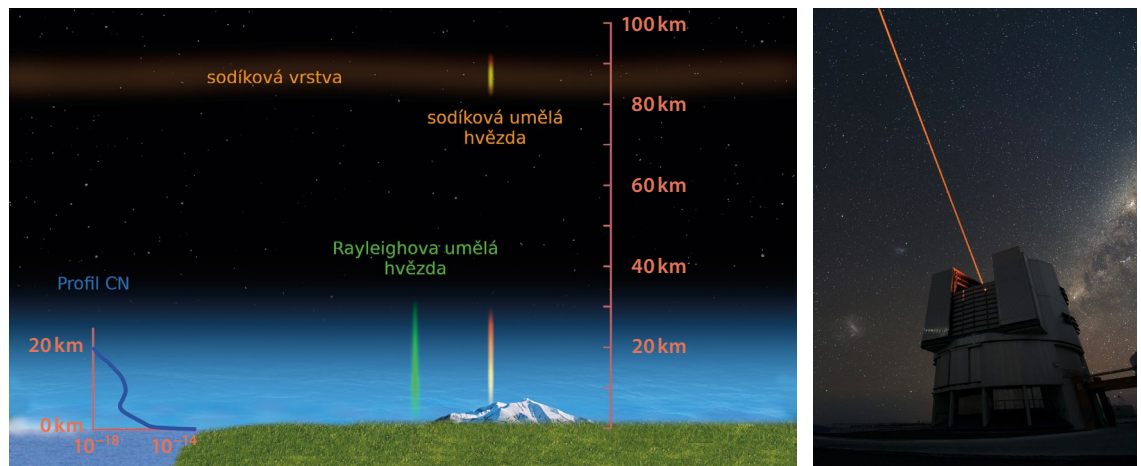


Horace W. Babcock okolo roku 1978. Americký astronom a zakladatel adaptivní optiky.

Ze začátku se vývoj soustředil především na vývoj detektorů vlnoplochy, který poměrně rychle přinesl technologii Shackova-Hartmannova senzoru vlnoplochy. Ten poskytoval dostatečně kvalitní informace o vlnoploše pro účely řízení korektoru a stal se od té doby jednoznačně nejpoužívanějším a nejoblíbenějším senzorem vlnoplochy. Od 70. let se potom začaly více objevovat i různé fázové korektory a postupně byly konstruovány první systémy adaptivní optiky, které však narážely na různé sekundární problémy a výkonem se příliš nepřibližovaly teoretickým předpovědím. Během 80. let byly metody řízení tehdejších systémů adaptivní optiky stále založeny z větší části na analogové technologii a jako takové se vyznačovaly pouze omezenou flexibilitou či vůbec použitelností.

V oblasti infračervené astronomie byla situace příznivější a v této době již existovalo několik funkčních systémů, které poskytovaly korekci atmosférických turbulencí [4]. Pro infračervené světlo jsou požadavky na adaptivní systém značně redukovány, a to jak do míry velikosti korekcí, tak i frekvence, s jakou je třeba korekce provádět. Ani pro viditelnou oblast vlnových délek nebyly požadavky na rychlost systému mimo technologické možnosti, ale jako hlavní překážka byl vnímán především požadavek na dostatečně jasný cíl pozorování. Ačkoliv byla technologie ikonoskopů v 70. letech 20. století nahrazena modernějšími CCD čipy, čímž byla asi desetkrát zvýšena citlivost světločivných senzorů, byl pro správnou funkci senzoru vlnoplochy stále potřeba poměrně jasný signál neboli jasný cíl pozorování. Část světla pozorovaného objektu je totiž potřeba i pro senzor vlnoplochy, který zprostředkovává zpětnou vazbu pro adaptivní smyčku. Dostatečně jasných objektů pozorování je ovšem jen omezené množství. Pokud je cíl pozorování slabší intenzity, je pro signál senzoru vlnoplochy možno použít i jasnou hvězdu v jeho blízkosti, tzv. průvodní hvězdu (*Natural Guide Star* – NGS). To, jak moc může být tato průvodní hvězda vzdálena od cíle pozorování, souvisí s velikostí tzv. izoplanatické oblasti a ta závisí na vlnové délce. V případě infračervené astronomie je možno použít NGS vzdálených od cíle pozorování podstatně více, než je tomu u viditelných vlnových délek. Ve svém důsledku tedy platí, že





**Obr. 3** Vlevo: Schéma struktury zemské atmosféry včetně vertikální struktury dvou typů laserových umělých hvězd. Síla atmosférických turbulencí může být odvozena od vertikálního profilu koeficientu  $C_n$  vyjadřujícího míru fluktuací indexu lomu (dle tzv. Hufnagel-Valley<sub>5/7</sub> modelu). S narůstající výškou a řidnoucí atmosférou je vliv na vlnoplochu menší a nad cca 25 km je již zanedbatelný. Napravo: Laser sodíkové umělé hvězdy na teleskopu VLT, European Southern Observatory v Chile. Kredit: ESO/C. Malin

většina oblohy je pokryta dostatečně jasnými NGS pro infračervenou astronomii. Pro astronomii v oblasti viditelných vlnových délek je však za použití NGS možno zkoumat jen poměrně malou část oblohy. Právě tento problém, v kombinaci s vysokou cenou zařízení adaptivní optiky, zásadně komplikoval její reálné použití pro pozemské teleskopy ještě na konci 80. let [5].

K zásadnímu posunu došlo na počátku 90. let, kdy byla odtajněna značná část armádního vývoje adaptivní optiky ve Spojených státech [6, 7]. Toto bylo umožněno především uvolněním politické situace ve světě, ale jedním z faktorů, který nakonec o odtajnění rozhodl, byl i fakt, že technologie umělých laserových hvězd (*Laser Guide Star* – LGS), která se jevila jako hlavní oblast výzkumu v oboru pro nadcházející léta, byla již armádou vyvinuta [8]. Jejím odtajněním bylo tedy ušetřeno významné množství času a prostředků, které by si vyžádal její opětovný vývoj astronomickou komunitou. Technologie LGS (viz obr. 3) umožňuje vytvořit pomocí laseru umělý zdroj světla vysoko nad turbulentní atmosférou, který slouží jako silný zdroj optického signálu pro systém adaptivní optiky.

Existují dva základní typy LGS. První využívá rozptylu laserového záření v atmosféře (tzv. Rayleighův rozptyl) a část světla, jež je rozptýlena ve zpětném směru, je možno použít coby signál pro senzor vlnoplochy. Aby bylo možno použít pouze část rozptýlenou ve vyšších částech atmosféry, je používáno časového hradlování signálu. Druhý typ využívá vrstvy sodíkových iontů ve vrchní části atmosféry ve výšce okolo 90 km. Ta je přítomna všude na světě a za pomoci intenzivního laserového záření o charakteristické vlnové délce 589,3 nm (barva tohoto záření bývá označována jako jantarová)<sup>2</sup> lze excitovat její atomy, které následně září a tvoří zdroj záření dostatečně vysoko nad turbulentní vrstvou atmosféry.

Oba tyto zdroje záření je možné vytvořit kdekoli na obloze a je tak umožněno pozorování jakéhokoli cíle. Vertikální profil obou typů LGS je znázorněn na obrázku 3, kde je v levé části zkratkovitě znázorněn i profil relativního vlivu atmosféry na vlnoplochu v závislosti na nadmořské výšce. Pro tyto účely je běžně používán parametr  $C_N$ , jenž vyjadřuje míru velikosti

fluktuací indexu lomu v dané výšce. Z jeho průběhu je jasně vidět, že je silně závislý na nadmořské výšce a husté vrstvy atmosféry nad zemským povrchem přispívají zásadní měrou. Nad 20 km je již vliv atmosféry oproti hustým vrstvám při povrchu v podstatě zanedbatelný (více než o 4 řády menší).

Laserové umělé hvězdy, jejichž mechanismus byl dobře popsán, trpěly v této době již jen posledním technologickým nedostatkem, který spočíval v nedostupnosti vhodných zdrojů laserového záření patřičné vlnové délky a dostatečného výkonu. I tento aspekt však bylo možné řešit s použitím tehdejší technologie laditelných barvivových laserů a postupně se objevila i další vhodnější řešení. Tím byl požadavek na jasné NGS v blízkosti pozorovaných cílů odstraněn a byl tak vyřešen jeden z hlavních problémů bránících použití adaptivních systémů pro viditelnou oblast. Navíc, ačkoliv jsou LGS poměrně velice jasné zdroje, nejsou nijak rušivé pro vlastní obraz pozorovaného objektu, jelikož je možno jejich úzkospektrální světlo odfiltrat pomocí vhodného spektrálního filtru.

Poté, co byla technologie odtajněna a představena astronomické komunitě, začaly se systémy AO instalovat pomalu na každý významnější teleskop té doby [9–11]. Díky významným pokrokům v informačních technologiích na konci 20. a začátku 21. století prodělala technologie adaptivní optiky další zásadní pokrok v oblasti řídicích systémů, schémat použití adaptivních elementů, zdokonalil se návrh deformovatelných zrcadel a senzory vlnoplochy doznaly významného zrychlení a zvýšení jejich použitelnosti v důsledku aplikace digitálních technik pracujících v reálném čase. Aplikace digitálních technologií nastavila nové standardy flexibility použití, modularity systémů a zásadně posunula možnosti jejich průběžného zlepšování a vývoje. Masivní nárůst dostupného výpočetního výkonu umožnil řádově vyšší prostorová rozlišení adaptivních systémů oproti nedávné minulosti [12]. S postupným pronikáním technologie i do dalších odvětví a obecnému rozšiřování trhu došlo postupně i ke zlevnění technologie, což tento trend dále podpořilo.

### Současnost

V současnosti se systémy adaptivní optiky používají v podstatě na každém větším pozemském astronomickém

<sup>2</sup> Pozn. Jedná se o dvojitou čáru, tzv. dublet, s vlnovými délkami 589,0 a 589,6 nm.

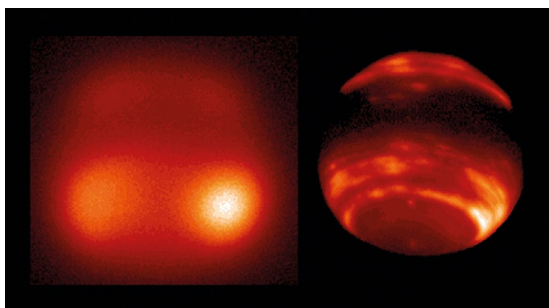
kém teleskopu. Pro teleskopy nové generace, jež jsou ve výstavbě na předních světových pozorovacích lokalitách, většinou představují zásadní technologii, na kterou se soustředí celý vědecký tým a která vůbec umožňuje dosažení vytyčených cílů. Odvěké omezení pozemského pozorování ve viditelné a blízké infračervené oblasti tak bylo prakticky překonáno.

Zajímavé je ale použití této technologie i v jiných odvětvích. Druhou nejstarší oblastí využití adaptivní optiky je laserová technika a adaptivně optické systémy zde slouží především k potlačení optických aberací, jež jsou vneseny do laserového svazku zejména v důsledku tepelného namáhání zesilujícího ziskového prostředí a značného množství optických elementů, které vždy obsahují určité vady z výrobního procesu. Díky opravě vlnoplochy laserového svazku se snižují ztráty energie v jednotlivých zesilovačích a výrazně se zvyšuje schopnost zacílení laserového svazku na cíl (tzv. fokusace). Tím je v důsledku dosaženo zvýšení intenzity v daném bodě až o několik řádů. Pro laserové opracování je potom zajímavá schopnost adaptivně řídit tvar ohniska laserového svazku, což může výrazně zvýšit přesnost a rychlost opracování.

V oblasti optické komunikace v atmosféře je adaptivní optika technologií, která vůbec umožňuje její praktickou použitelnost. Optické linky mezi satelity na orbitě jsou již dnes běžně používanou technologií bez adaptivních prvků, ale pro komunikaci se zemí je potřeba použití adaptivní optiky. V současnosti se vývoj v této oblasti dostává do své poslední fáze a nahrazení dosavadních mikrovlnných spojení optickými lze očekávat v blízké době.

V mikroskopii je využití adaptivních systémů ještě poměrně nové, ale přednosti tohoto přístupu jsou zcela jasně patrné. Korektor vlnoplochy je zde často řízen pomocí jiného senzoru, než je senzor vlnoplochy. Nejčastěji řídicí smyčka používá přímo vědeckou kameru ke zjištění vhodného korekčního efektu. Adaptivní optika tak přispěla k získání precizních snímků z podstatně větších hloubek vzorků (to znamená zobrazování skrze tlustší vrstvu), nebo například ke zviditelnění jednotlivých světločivných buněk v oku živých myší [13], což bez této technologie nebylo možné.

Na závěr bychom se mohli ještě zamyslet nad budoucností diskutovaného oboru. Vzhledem k současným trendům lze předpokládat, že adaptivní optika, coby technologie spoléhající z velké míry na výpočetní výkon, se bude stávat stále dostupnější a běžnější technologií ve všech oblastech jejího současného využití. Ze stejných důvodů lze také předpokládat její integraci do nových oblastí, cílicí především na návrhy středně drahých přístrojů, jež díky klesající ceně adaptivně optických komponent budou schopny tyto integrovat.



**Obr. 4** Srovnání snímku planety Neptun bez použití systému adaptivní optiky (nalevo) a při jeho použití (napravo). Kredit: University of California, Santa Cruz



Moderní korektor vlnoplochy (deformovatelné zrcadlo) pro teleskop VLT, umístěný v Chile. Povrch deformovatelného zrcadla jetvořen skleněnou deskou o průměru 1,12 m a tloušťce pouhých 2 mm. Pro deformaci povrchu zrcadla je použito 1170 cívkových aktuátorů umístěných na jeho zadní straně. Kredit: ESO

Nové systémy, které jsou ve vývoji pro budované teleskopy nové generace (ELT, TMT apod.), většinou počítají s použitím několika senzorů vlnoplochy či fázových korektorů a pokročilých systémů řízení takto komplexních systémů. V tomto smyslu je tedy pomyslná hranice možného stále posouvána, zatímco v její brázdě se dostává vyvinutým technologiím užítku v mnoha jiných oborech, kde působí stejným způsobem.

## Reference

- [1] H. W. Babcock: „The Possibility of Compensating Astronomical Seeing“, Publications of the Astronomical Society of the Pacific **65**, 229–236 (1953).
- [2] N. Hubin, L. Noethe: „Active Optics, Adaptive Optics, and Laser Guide Stars“, Science **262**, 1390–1394 (1993). DOI: 10.1126/science.262.5138.1390.
- [3] J. Stock, G. Keller: „Astronomical Seeing“, in *Telescopes, Stars and Stellar Systems*. Eds. G. Kuiper and B. Middlehurst. University of Chicago Press, Chicago 1961, s. 138.
- [4] J. Beckers, F. Merkle: „Adaptive optics for large telescopes“, Astrophysics and Space Science **160**, 345–351, (1989). DOI: 10.1007/BF00642789.
- [5] J. Hardy, F. Roddier: „Instrumental limitations in adaptive optics for astronomy“, *Active Telescope Systems*, Proceedings Paper **1114**, 2–13 (1989).
- [6] G. Collins: „Making the stars to see stars – DOD adaptive optics work is declassified“, Physics Today, **45**, 17–21 (1992). DOI: 10.1063/1.2809522.
- [7] J. W. Hardy: „Adaptive optics – problems and prospects“, Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers **293**, 214–221 (1981).
- [8] R. Foy, A. Labeyrie: „Feasibility of adaptive telescope with laser probe“, Astronomy & Astrophysics Letter **152**, L29–L31 (1985).
- [9] B. Kelley: „Adaptable Optics“, SPIE Professional (2010). DOI: 10.1117/2.4201001.05.
- [10] J. R. P. Angel, P. Wizinowich, M. Lloydhart, D. Sandler: „Adaptive optics for array telescopes using neural-network techniques“, Nature **348**, 221–224 (1990). DOI: 10.1038/348221a0.
- [11] W. P. McCray: *Giant Telescopes: Astronomical Ambition and the Promise of Technology*. Harvard University Press, Oxford (MS) 2004.
- [12] L. Thompson: „Adaptive Optics in Astronomy“, Physics Today **47**, 24–31 (1994). DOI: 10.1063/1.881406
- [13] S. Bonora et al.: „Wavefront correction and high-resolution in vivo OCT imaging with an objective integrated multi-actuator adaptive lens“, Optics Express **23**, 21931–21941 (2015). DOI: 10.1364/oe.23.021931.