

Moderné astronomické prístroje a metódy

Július Koza

Astronomický ústav SAV, 059 60 Tatranská Lomnica

Príspevok je pokusom stručne charakterizovať rozsiahly arzenál súčasných astronomických prístrojov a metód s krátkym presahom do blízkej budúcnosti. Podstatným znakom astronomického výskumu je multispektrálnosť s nasadením kozmických observatórií. Veľký pozemský optický teleskop už sám o sebe nestačí a k dosiahnutiu perfektného obrazu daného difrakčným limitom je nevyhnutná aktívna a adaptívna optika s následnou rekonštrukciou obrazu založenou na Fourierovej transformácii. Interpretáčnym nástrojom napomáhajúcim pochopiť a vysvetliť pozorovania sú počítačové numerické simulácie. Vybrané vzorky sú kompromisom poznačeným profesionálnym zameraním autora na fyziku Slnka v najlepšej snahe zachovať ich všeobecnejšiu platnosť.

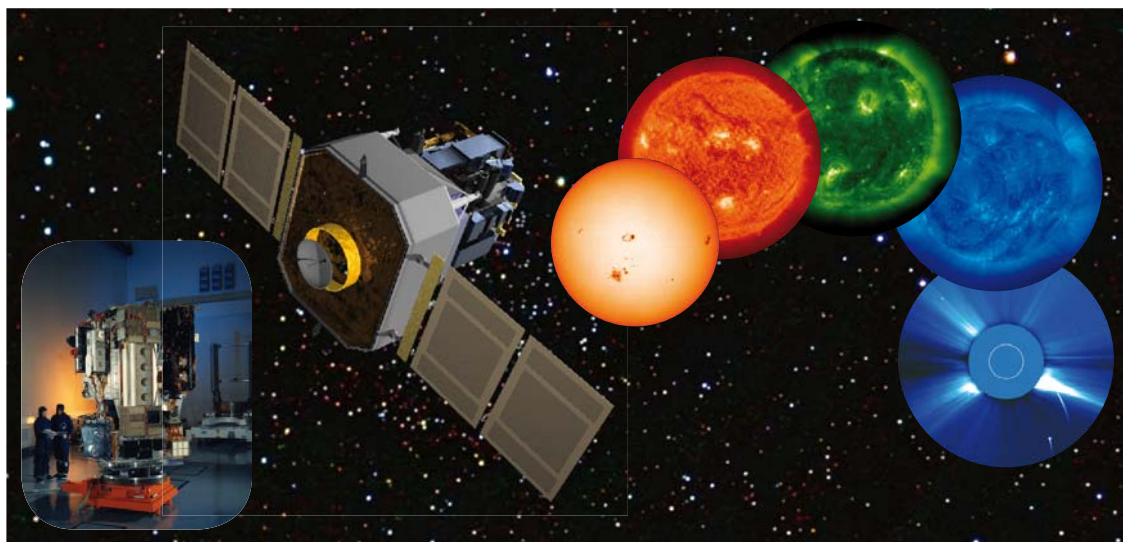
Úvod

Začiatkom 20. storočia nastala kvalitatívna zmena astronómie na astrofyziku, ktorá využíva poznatky takmer všetkých oblastí fyziky pri výskume vesmíru, astronomických objektov a javov. S nástupom rádioteleskopov v polovici 20. storočia prestal byť optický teleskop, vynájdenný práve pred štyristo rokmi, jediným prostriedkom poznávania vesmíru. Odvtedy astrofyzici umiestnili svoje špeciálne teleskopy a detektory aj na kozmické sondy, ako aj hlboko pod zemský povrch a hladinu morí snažiac sa tam zachytiť ťažko polapiteľné neutrína vznikajúce v jadre Slnka, v extrémnych

podmienkach explodujúcich supernov a aktívnych jadier galaxií. Kozmická technika umožnila výskum objektov Slnčnej sústavy z bezprostrednej blízkosti a dokonca umožnila odber vzoriek a ich dopravu na Zem na ďalšiu laboratórnu analýzu. V poslednej tretine 20. storočia astronómii a astrofyzike revolučne ovplyvnil prudký rozvoj techniky a špeciálne výpočtovej techniky a súvisiacich informačných technológií. História astronómie a astrofyziky možno vnímať aj ako napĺňanie starších alebo len nedávnych snov a vízií. Tak to bolo aj s objavom exoplanét v poslednej dekáde 20. storočia, ktorých možná existencia bola predvídaná už v 18. storočí. Na druhej strane rozsiahle numerické simulácie vývoja Slnčnej sústavy, galaxií a dokonca celého vesmíru, adaptívnu optiku a detektory rozlišujúce energiu dopadajúcich fotónov astronómovia kedysi nepredpokladali ani v tých najodvážnejších snoch. Jedným zo znakov moderného astrofyzikálneho výskumu je multispektrálnosť nielen v rozsahu elektromagnetického žiarenia, ale pokrývajúceho aj časticové žiarenie a intenzívne prebiehajú experimenty snažiac sa zachytiť gravitačné vlny predpovedané Einsteinovou všeobecnou teóriou relativity. Ďalším znakom je interpretovanie pozorovaní pomocou numerických simulácií umožňujúcich tak v istom slova zmysle experimentálne skúmať procesy a javy, ktoré nie je možné napodobniť v laboratóriu. Moderný astrofyzikálny výskum sa stal nadnárodným a medzinárodným, spájajúcim intelektuálny, technický a ekonomický potenciál zúčastnených krajín s cieľom nájsť uspokojivú odpoveď na zásadné otázky typu: ako vznikol vesmír, ako sa sformovala naša Galaxia, ako vznikli hviezdy a planéty a aký je ich vývoj, aké je naše postavenie vo vesmíre. Tieto otázky a hľadanie možných odpovedí mimoriadne pozorne sleduje celá verejnosť.



Obr. 1 Kozmické röntgenové observatórium XMM-Newton (X-ray Multi-Mirror-Mission).



Obr. 2 Slnčné kozmické observatórium SOHO umožňuje moderný multispektrálny výskum Slnka, ktorý nie je z povrchu Zeme mysliteľný.

Multispektrálny výskum a kozmické observatória

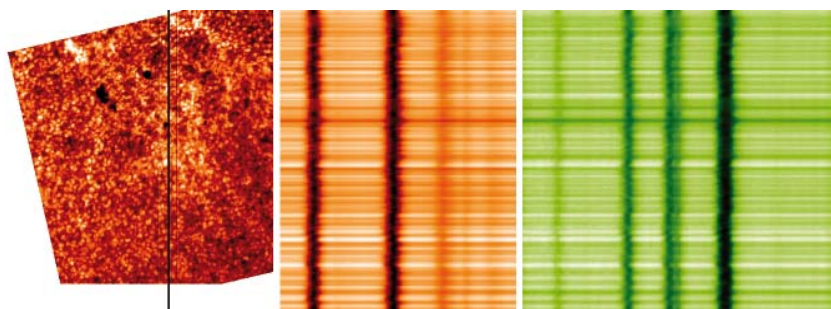
Svetlo s vlnovou dĺžkou od 400 do 760 nm je len veľmi krátkym úsekom širokého spektra elektromagnetického žiarenia vysielaného kozmickými objektmi. Atmosféra Zeme je dokonale priehľadná pre rádiové vlny a viditeľné svetlo, v krátkom úseku čiastočne pre infračervené a mikrovlnné žiarenie, a naopak účinne blokuje krátkovlnné zložky spektra s vlnovou dĺžkou kratšou ako vlnová dĺžka svetla. Práve v týchto krátkovlnných zložkách vyžarujú energiu astrofyzikálne procesy erupčívneho a kataklizmického charakteru ako aj kompaktné objekty v extrémnych fyzikálnych podmienkach. Výskum slnečnej koróny a erupcií, aktívnych jadier galaxií, akreačných diskov, zvyškov supernov a záhadných gama zábleskov by neexistoval alebo bol silne obmedzený, ak by astrofyzika nemala prístup k týmto častiam spektra. Tie boli sprístupnené až s nástupom kozmickej techniky umožňujúcej vyniesť ultrafialové, röntgenové a gama teleskopy mimo atmosféru Zeme. Výhody kozmického vákuu využili aj optické a infračervené teleskopy ako Hubbleov a Spitzerov kozmický teleskop a nedávno vypustený infračervený teleskop Herschel, ktorý s priemerom zrkadla 3,5 m je momentálne najväčším kozmickým teleskopom. Prekoná ho až kozmický teleskop Jamesa Webba s priemerom zrkadla 6,5 m, ktorého vypustenie je plánované na rok 2013. Okrem výhod, akými sú odstránenie rušivého vplyvu atmosféry Zeme na pozorovania, prístup ku krátkovlnným častiam spektra a eliminovanie pozorovacích medzier spôsobených striedaním dňa a noci, však kozmické prostredie stavia aj nové obmedzenia. Hlavným je limitovaný priemer zrkadiel teleskopov, ktorý je daný konštrukciou nosnej rakety. Toto čiastočne riešia segmentové zrkadlá, no ich skladanie v kozme je technicky mimoriadne zložitý problém. Ďalej je to relatívne krátke trvanie činnosti kozmického observatória v porovnaní so životnosťou pozemských prístrojov. V tomto ohľade sú rekordéromi Hubbleov kozmický teleskop vypustený na obežnú dráhu v roku 1990 a Slnčné heliosférické observatórium SOHO, ktoré je v činnosti od roku 1995, prežijúc aj krátky výpadok v roku 1998. V prípade kozmických teleskopov pre mikrovlnnú a infračervenú oblasť limituje ich životnosti zásoba chladiaceho média, najčastejšie tekutého hélia. Napríklad predpokladaná

životnosť spomenutého infračerveného teleskopu Herschel bude okolo tri a pol roka a v prípade nového mikrovlnného teleskopu Planck len pätnásť mesiacov.

Súčasný astrofyzik skúmajúci povedzme aktívne jadro galaxie, kombinuje rádiovú emisiu jadra, infračervené pozorovania plynno-prachovej zložky galaxie s optickou snímkou štruktúry galaxie doplnenou o ultrafialovú a röntgenovú emisiu. Navyiac v každom pásme prebieha pozorovanie vo viacerých filtroch alebo kanáloch vymedzujúcich užší rozsah danej zložky spektra charakteristický pre určitý fyzikálny proces. Kozmológ zasa spája mikrovlnné pozorovania kozmického pozadového žiarenia s optickými snímkami kóp galaxií a veľkoškálovej štruktúry vesmíru. Toto si vyžaduje nasadenie viacerých pozemských a kozmických teleskopov a je to väčšinou kolektívna práca, do ktorej býva zapojených viacero členov výskumného tímu. Simultánnosť pozorovaní všetkých uvedených teleskopov v tom istom čase nie je v tomto prípade nevyhnutná. Tá je naopak mimoriadne dôležitá pri výskume javov ako gama záblesky, vzplanutia kataklizmických hviezd, nov a supernov. Prvý zo spomenutých javov trvá tak krátko, že kozmický gama teleskop automaticky po jeho zachytení vysielá údaje o polohe záblesku veľkému pozemskému optickému teleskopu, ktorý s čo najmenším oneskorením začína snímkať daný výsek oblohy snažiac sa tak zachytiť optický náprotivok, a tak identifikovať zdroj záblesku.

Moderný výskum atmosféry Slnka a štúdium erupčívnych javov v nej si vyžaduje simultánne multispektrálne pozorovania s veľkým spektrálnym, časovým a priestorovým rozlíšením. Okrem intenzity dopadajúceho žiarenia je veľká pozornosť venovaná meraniu jeho polarizácie, ktorá nesie informáciu o slnečnom magnetizme. Polarimetrické pozorovania Slnka sú vykonávané hlavne v infračervenej, optickej a rádiovkej oblasti spektra. Vákuový vežový teleskop VTT umožňuje simultánnu spektroskopiu, polarimetriu a snímkovanie slnečnej fotosféry a chromosféry vo viacerých oblastiach vizuálnej a blízkej infračervenej časti spektra. Význam multispektrálnych pozorovaní spočíva hlavne v tom, že umožňujú diagnostikovať fyzikálne podmienky rôznych oblastí slnečnej atmosféry vo vertikálnom smere, pretože hĺbka, do ktorej je možné dovidieť, silne závisí od vlnovej dĺžky. Simultánne

» Moderný výskum atmosféry Slnka a štúdium erupčívnych javov v nej si vyžaduje simultánne multispektrálne pozorovania s veľkým spektrálnym, časovým a priestorovým rozlíšením. ◀◀



Obr. 3 Granulácia a pór v slnečnej fotosfére (vľavo). Čiara znázorňuje polohu štrbiny spektrografu počas pozorovania. Spektrá fotosféry (vpravo) získané pomocou Vákuového vežového teleskopu VTT na ostrove Tenerife.

multispektrálne pozorovania tak umožňujú študovať vybraný jav a jeho dôsledky súčasne v rôznych výškových hladinách slnečnej atmosféry. Analýza polarimetrie poskytuje informáciu o veľkosti a orientácii vektora magnetického poľa, ktorým je preniknutá celá slnečná atmosféra a je dominantným prvkom štruktúr pozorovaných v chromosfére a koróne. Pre adekvátny výskum týchto vrstiev sú však nevyhnutné pozorovania z kozmických slnečných observatórií. Vysoká teplota chromosféry a koróny je dôvodom prečo istá časť ich žiarenia je emitovaná v ultrafialovej a röntgenovej oblasti. Približne 22-ročná perióda magnetického cyklu Slnka sa výrazne prejavuje v týchto spektrálnych oblastiach, v ktorých sa Slnko javí ako silne premenná hviezda. Hoci výrony koronálnej hmoty sú pozorované vo vizuálnej oblasti, ich pozorovania sú možné výlučne len prostredníctvom koronografov umiestnených na kozmických observatóriách. Ich vplyv na kozmické počasie v okolí Zeme je možné posúdiť priamym meraním hustoty častíc slnečného vetra a magnetického poľa vmrznutého v oblaku vyvrhutej koronálnej plazmy.

Veľké pozemské optické teleskopy

Astronomický prístroj je možné všeobecne definovať ako technické zariadenie pre pozorovanie a výskum kozmických objektov a javov za atmosférou Zeme ako aj sekundárnych javov vyvolaných kozmickými objektmi v zemskej atmosfére. Astronomické prístroje je možné klasifikovať napríklad podľa ich umiestnenia (pozemské, kozmické) skúmaného objektu (slnečné, telesá a javy v Slnečnej sústave, objekty a javy mimo Slnečnú sústavu), druhu žiarenia (rádioteleskopy, infračervené, optické, ultrafialové, röntgenové, gama teleskopy), prípadne druhu skúmaných elementárnych častíc (neutrína, elementárne častice). Do zvláštnej skupiny by patrili detektory gravitačných vln a Čerenkovovho žiarenia.

Tento krátky zoznam nie je ani zďaleka úplný. Je pochopiteľné, že v rámci obmedzeného rozsahu nášho príspevku nemôžeme uviesť ani len stručnú charakteristiku najmodernejších prístrojov zo spomenutých kategórií. Preto sa zameriame len na veľké pozemské optické teleskopy. V tabuľke 1 je zoznam najväčších optických teleskopov s priemerom primárneho zrkadla viac ako 8 m, ktoré sú v čase písania tohto článku v plnej prevádzke alebo krátko pred dokončením, ako napríklad Grantecan a LBT. Jedným z hlavných kritérií pri výbere lokality umiestnenia veľkých teleskopov je kvalita astroklímy. Pod týmto pojmom rozumieme čo najväčší počet jasných nocí v roku, suchú a priezračnú atmosféru s čo možno najmenšou turbulenciou vzduchu. Týmto požiadavkám najlepšie vyhovujú napríklad púšte v podhorí Ánd v Chile, oblasti stredozápadu USA a vrcholy vyhasnutých sopiek Havajských a Kanárskych ostrovov. Napriek odľahlosti a nehostinnosti vysoká kvalita astroklímy týchto lokalít zaručuje veľmi efektívne využitie pozorovacieho času, a teda aj vysokých finančných prostriedkov investovaných do vybudovania observatórií. Výroba veľkých astronomických zrkadiel v minulosti narážala na dva problémy. S rastúcim priemerom zrkadla rastú aj deformácie jeho tvaru spôsobené vlastnou hmotnosťou pri meniacich sa polohách zrkadla. Zvyšovanie hrúbky zrkadla však vedie k neúmernému nárastu hmotnosti zrkadla a súvisiacich technických a finančných problémov. Riešením sú takzvané segmentové zrkadlá a tenké meniskové zrkadlá. Plocha segmentových zrkadiel pripomína mozaiku zostavenú z menších a ľahkých šesťhranných zrkadiel. Napríklad zrkadlá teleskopov Grantecan, Keck I a II (Tabuľka 1) pozostávajú z 36 šesťhranných segmentov. Pomenovanie meniskových zrkadiel je odvodené z faktu, že ich hrúbka (15 až 20 cm) je v porovnaní s priemerom zrkadla (8 m a viac) veľmi malá. Obe riešenia si však vyžadujú podporný systém takzvanej aktívnej optiky pozostávajúcej zo sústavy piezoelektrických piestov (obvykle 100 až 200 kusov), na ktorých spočíva celá plocha zrkadla. Piesty na základe informácie z takzvaného CCD Shackovho-Hartmannovho senzora upravujú v reálnom čase plochu zrkadla do tvaru čo najbližšie k ideálnemu tak, aby kompenzovali deformácie spôsobené jeho vlastnou hmotnosťou a zároveň aj rôzne optické aberácie (zaostrenie obrazu, koma, astigmatizmus atď.). To je možné vďaka istej pružnosti meniskového zrkadla. Zmeny tvaru zrkadla pôsobením aktívnej optiky sú však veľmi malé.

Moderné optické teleskopy sú často budované v bezprostrednej blízkosti. To je prípad štvorice teleskopov

Meno	Priemer zrkadla	Poloha, poznámka
Grantecan GTC	10,4 m	Kanárske ostrovy, zrkadlo z 36 segmentov
Keck I a Keck II	10,0 m	Havajské ostrovy, dva rovnaké teleskopy
Veľký juhoafrický teleskop SALT	~ 10 m	Juhoafrická republika, len pre spektroskopiu
Hobby-Eberly teleskop HET	9,2 m	Texas, sférické zrkadlo len pre spektroskopiu
Veľký binokulárny teleskop LBT	8,4 m	Arizona, pár zrkadiel ekvivalentný 11,8 m
Subaru	8,3 m	Havajské ostrovy, Subaru patrí Japonsku
Veľmi veľký teleskop VLT	8,2 m	Chile, štvorica rovnakých teleskopov
Gemini Sever (Gillett)	8,1 m	Havajské ostrovy, dvojča Gemini Juh
Gemini Juh	8,1 m	Chile, dvojča Gemini Sever

Tab. 1 Deväť najväčších pozemských optických teleskopov. Žltou sú podfarbené teleskopy so segmentovými primárnymi zrkadlami a modrou teleskopy s tenkými kompaktnými zrkadlami.

VLT, dvojice Keck I a II a LBT (Tabuľka 1). Teleskopy tak môžu pozorovať nezávisle rôzne objekty alebo ten istý objekt a ich svetlo môže byť privedené do jedného spoločného ohniska. Tým je možné dosiahnuť podstatne vyššiu uhlovú rozlišovaciu schopnosť ako pri použití jedného teleskopu a spojené teleskopy pracujú ako veľký interferometer. Napríklad VLTI (VLT interferometer) spájajúci všetky štyri 8,2 m teleskopy VLT je ekvivalentom teleskopu s priemerom zrkadla 200 m. VLTI tak môže dosiahnuť v blízkej infračervenej oblasti vo vlnovej dĺžke 1 mikrometer uhlové rozlíšenie až 1 milisekundu, čo zodpovedá dĺžke 2 m videnej vo vzdialenosti Mesiaca.

Moderné optické teleskopy majú altazimutálnu montáž a otvorenú rámovú konštrukciu nesúcu primárne a sekundárne zrkadlo. Otvorená rámová konštrukcia umožňuje najlepšiu ventiláciu zrkadiel s cieľom dosiahnuť čo najpresnejšie vyrovnanie teploty zrkadiel s teplotou okolitého vzduchu. To zamedzuje nežiaducej internej turbulencii nad plochami zrkadiel, ktorá poškodzuje obraz pozorovaného objektu. K potlačeniu internej turbulencie prispievajú aj plne otvárateľné steny kupoly teleskopu, ktoré majú žalúziiovú konštrukciu. Prístroje sú umiestnené buď v Cassegrainovom ohnisku prístupnom cez kruhový otvor v primárnom zrkadle, alebo vo dvoch Nasmythových ohniskách na platformách montáže, kam je privádzané svetlo cez duté osi montáže pomocou šikmého terciárneho zrkadla umiestneného nad otvorom primárneho zrkadla. Cez otvory v osiach montáže môže byť svetlo privedené sústavou pomocných zrkadiel aj do Coudé ohniska v priestoroch pod teleskopom. V ohniskách sú najčastejšie umiestnené spektrogrfy, spektrometre prípadne veľkoformátové CCD kamery. Obvykle je jeden teleskop vybavený viacerými spektrografmi pre rôzne spektrálne oblasti s rôznou disperziou, teda s rôznym spektrálnym rozlíšením. Pre čo najefektívnejšie využitie pozorovacieho času spektrogrfy spravidla získavajú spektrá súčasne z niekoľko desiatok až stovák objektov. To umožňujú optické vlákna upevnené na maske v bodoch, kde sú v ohnisku teleskopu vytvorené obrazy pozorovaných objektov. Zväzok optických vlákien privádza svetlo z obrazovej roviny v ohnisku do spektrografu. Príslušenstvom teleskopu sú aj viaceré CCD kamery s rôzne veľkými senzormi určenými pre pozorovanie buď vo vizuálnej, alebo infračervenej oblasti spektra. Pre potlačenie šumu sú kamery a spektrogrfy chladené tekutým dusíkom.

Pozorovací čas veľkých teleskopov je pridelovaný astronómom podľa prísnych pravidiel na základe súťaže. Na začiatku musí byť jasná a dobre odôvodnená myšlienka, čo chce astronóm pozorovať. Myšlienku musí astronóm stručne sformulovať a spísať do podoby pozorovacieho návrhu, ktorý má rozsah štyroch – piatich strán, nie však viac ako osem. V ňom musí čo najpresvedčivejšie zdôvodniť, ako realizácia jeho myšlienky prispeje k pokroku poznania v danej oblasti astronómie. Hotový návrh pošle komisii hodnotiacej všetky prijaté návrhy a pridelujúcej pozorovací čas. Pochopiteľne, čím väčší a drahší teleskop, tým prísnejšie sú návrhy posudzované. Napríklad v prípade VLT uspeje v priemere len jeden z piatich návrhov. Ak je žiadateľ úspešný, získava v prípade VLT obvykle tri pozorovacie noci na niektorom z teleskopov VLT. Vo výnimočných prípadoch je to až sedem nocí. Ak je pozorovacia kampaň úspešná, astronóm počas týchto niekoľkých nocí získava také veľké množstvo pozorovacích dát, že ich



Obr. 4 Teleskop Gemini s priemerom zrkadla 8,1 m je príkladom veľkého moderného astronomického teleskopu s otvorenou rámovou konštrukciou na altazimutálnej montáži.

spracovanie a analýza mu zaberajú pol roka až celý rok práce. Konečným cieľom jeho práce je publikovanie získaných výsledkov v niektorom odbornom astronomickom časopise. Z najvýznamnejších možno spomenúť *Astronomy & Astrophysics*, *The Astronomical Journal*, *The Astrophysical Journal* a *The Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Úspešnosť astronóma je hodnotená podľa počtu článkov uverejnených v týchto časopisoch. Jeho šance získať ďalší pozorovací čas na veľkých teleskopoch závisí aj od publikovaných výsledkov získaných na základe pozorovacích dát z veľkých teleskopov.

Adaptívna optika

Zemská atmosféra veľmi nepriaznivo vplyva na kvalitu astronomických pozorovaní. Turbulentné vlnenie vzduchu je dôsledkom teplotných nehomogenít – rýchlo sa pohybujúcich bublín teplejšieho a chladnejšieho vzduchu. Bublíny možno prirovnať k šošovkám, ktoré majú rozdielnu veľkosť, orientáciu a index lomu. Svetelná vlnoplocha prechádzajúca takýmto turbulentným heterogénnym prostredím je silne deformovaná, v dôsledku čoho je obraz pozorovaného objektu neostrý a rozmazaný. Nepriaznivé atmosférické vplyvy poškodzujúce a deformujúce svetelnú vlnoplochu nazývajú astronómovia seeing.

Na eliminovanie vplyvu seeingu na kvalitu obrazu bol vyvinutý systém označovaný ako adaptívna optika. Jeho základnými prvkami sú analyzátor poškodenia svetelnej vlnoplochy (najčastejšie tzv. Shackov-Hartmannov senzor), malé náklonné a deformovateľné zrkadlá uložené na sústave piezoelektrických piestov. Senzor pozostáva zo sústavy miniatúrnych šošoviek vytvárajúcich obraz referenčného zdroja na svetlých elementoch CCD čipu. Z rôznych posunutí obrazov referenčného zdroja v dôsledku deformácie svetelnej vlnoplochy počítač v priebehu milisekúnd vypočíta korekciu, o ktorú piesty upravujú tvar deformovateľného

» Pozorovací čas veľkých teleskopov je pridelovaný astronómom podľa prísnych pravidiel na základe súťaže. «



Obr. 5 Laserový lúč adaptívnej optiky teleskopu Keck počas pozorovania. Lúč je voľným okom neviditeľný a zachytí ho len snímka s dlhým expozičným časom.

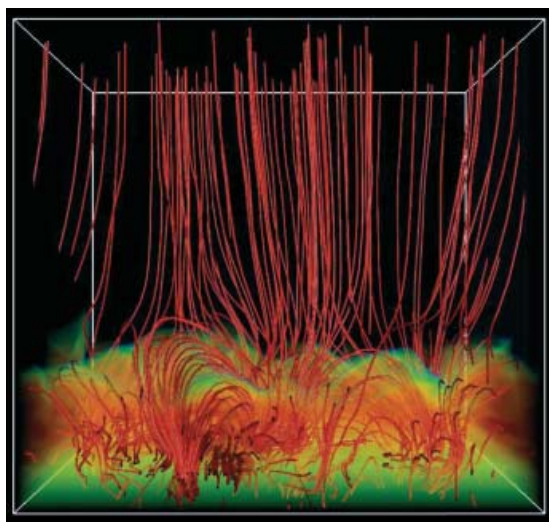
zrkadla tak, aby po odraze bolo korigované poškodenie svetelnej vlnoplochy. Deformácie zrkadla sú nepatrné a ich veľkosť je porovnateľná s vlnovou dĺžkou svetla a prebiehajú veľmi rýchlo. Referenčným zdrojom adaptívnej optiky je najčastejšie jasnejšia hviezda v blízkosti pozorovaného objektu (hmloviny, hviezdokopy, galaxie). Súčasný systém adaptívnej optiky však dokáže pracovať len ak je referenčná hviezda dostatočne jasná (typicky 12 až 15 mag). Tým je použiteľnosť adaptívnej optiky silne obmedzená len na objekty s dostatočne jasnou blízkou hviezdou najčastejšie blízko galaktickej roviny s veľkou hustotou hviezd. Toto obmedzenie prekonáva systém adaptívnej optiky využívajúci umelú, laserom vytvorenú navádzaciu hviezdu. Tento systém adaptívnej optiky je doplnený o malý vysielací reflektor pripojený k hlavnému teleskopu najčastejšie na opačnej strane držiaka sekundárneho zrkadla. Z laseru o výkone niekoľko wattov umiestneného mimo hlavného teleskopu je optickým vláknom privedený laserový lúč do ohniska vysielacieho teleskopu. Najčastejšie je využívaný laser s vlnovou dĺžkou približne 589 nm, v ktorej emituje sodík svoje dve známe oranžovožlté čiary. Laserový lúč excituje sodíkové atómy v mezofére vo výške 80-90 km nad povrchom, ktoré sú pozostávajúce z rozpadu meteoroidov. Excitované sodíkové atómy spätne žiaria a vytvárajú tak dostatočne jasnú laserovú navádzaciu hviezdu použiteľnú ako referencia pre adaptívnu optiku. Tá môže pracovať v režime buď otvorenej alebo uzavretej slučky. V prvom režime je poškodenie svetelnej vlnoplochy zamerané len raz a podľa toho je nastavené deformovateľné zrkadlo. V druhom režime prebieha vyhodnocovanie poškodenia kontinuálne a deformovateľné zrkadlo neustále mení svoj tvar. Vylepšenie obrazu adaptívnou optikou závisí aj od použitej vlnovej dĺžky. Napríklad teleskopy VLT a Keck dosahujú s podporou adaptívnej optiky rozlíšenie 30 až 60 oblúkových milisekúnd v infračervenej oblasti, zatiaľ čo ich rozlíšenie bez adaptívnej optiky v tejto vlnovej dĺžke je iba 1 oblúčová sekunda. Vo vizuálnej oblasti je prínos adaptívnej optiky o niečo menší.

Rekonštrukcia obrazu

Adaptívna optika významne redukuje poškodenie obrazu spôsobené atmosférickým seeingom, no nedokáže úplne odstrániť všetky reziduálne chyby vyššieho rádu. Na ich elimináciu boli vyvinuté metódy počítačovej rekonštrukcie obrazu, ktoré majú uplatnenie aj v prípade pozorovaní získaných bez použitia adaptívnej optiky. To je prípad Holandského otvoreného teleskopu DOT, ktorého multispektrálne pozorovania Slnka sú spracovávané prvou z ďalej spomenutých počítačových rekonštrukčných metód. V astronomickej praxi sú najpoužívanejšie metódy takzvanej škvŕnkovej rekonštrukcie a viacsnímkovej dekonvolúcie (voľne skráteneý preklad z angl. Multi-Frame Blind Deconvolution). Uvedené metódy sú založené na poznatku, že počas veľmi krátkych časových intervalov sa seeing takmer nemení. Napríklad pre denný seeing má interval stáleho seeingu trvanie približne 50 milisekúnd, počas ktorých, obrazne povedané, seeing zamrzne. Tomuto faktoru je podriadená pozorovacia stratégia. Slnko je dostatočne jasný zdroj umožňujúci získavať snímky veľmi krátkymi expozičnými časmi. Snímkovanie prebieha v rýchlom, doslova filmovom režime, v takzvaných salvách obsahujúcich okolo 100 snímok exponovaných v rýchlom slede za sebou časom typicky 10 milisekúnd. Snímka salvy s najvyšším kontrastom je považovaná za referenčnú, slúžiaca na odvodenie parametrov seeingu. Vlastná rekonštrukcia obrazu je vykonávaná prostriedkami komplexnej Fourierovej transformácie, pri ktorej sa namiesto s reálnymi snímkami pracuje s ich Fourierovým obrazom. Algoritmus je založený na predpoklade, že rozmazanie obrazu môže byť po-



Obr. 6 Holandský otvorený teleskop DOT (Dutch Open Telescope) na ostrove La Palma je príkladom moderného slnečného teleskopu s otvorenou rámovou konštrukciou, ktorý poskytuje časové série multispektrálnych obrazových pozorovaní slnečnej fotosféry a chromosféry.



Obr. 7 Výsledok numerickej simulácie štruktúry magnetického poľa v slnečnej chromosfére a koróne, ktorého siločiaru znázorňujú červené čiary.

písané ako konvolúcia (t.j. špeciálny integrál) obrazu s priestorovo nezávislou rozptyľovacou funkciou (voľný preklad z angl. Point Spread Function). Vďaka tomu je možné snímku rozložiť na menšie polia, ktoré sú ďalej rekonštruované. Počítačová rekonštrukcia obrazu je nevyhnutná pre dosiahnutie maximálneho rozlíšenia moderných teleskopov. Konečným cieľom použitia adaptívnej optiky a počítačovej rekonštrukcie je získať obraz s rozlíšením, ktoré je dané difrakčným limitom pre daný priemer zrkadla a vlnovú dĺžku. Teda také rozlíšenie, aké by mal daný teleskop v kozme bez rušivého vplyvu atmosféry.

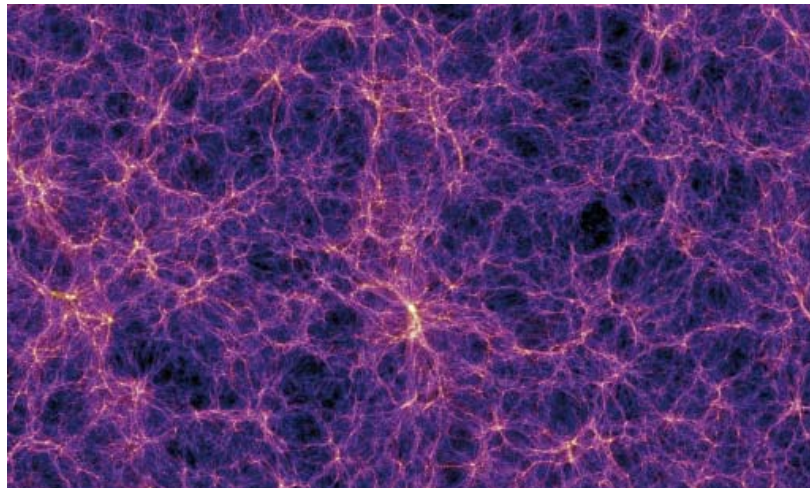
Numericke simulácie

Ďalším krokom nasledujúcim po získaní a spracovaní napozorovaných dát je ich interpretácia. To znamená vysvetlenie ich obsahu, porovnanie so známymi skutočnosťami, prípadne odhalenie a poukázanie na nové, doteraz neznáme fakty, o ktorých dáta svedčia. Jedným z interpretačných nástrojov modernej astrofyziky sú počítačové numericke simulácie. Tie v istom slova zmysle umožňujú robiť počítačové experimenty s astrofyzikálnymi javmi v podmienkach, ktoré nie je možné vytvoriť v laboratóriu. Numericke simulácie tak umožňujú reprodukovat javy astronomických rozmerov a extrémnych fyzikálnych podmienok. Východiskovým bodom je matematicko-fyzikálna teória, o ktorej predpokladáme, že správne popisuje daný jav. Takou je napríklad sústava diferenciálnych vektorových rovníc magnetohydrodynamiky, popisujúcich správanie ionizovaného plynu (plazmy) v prostredí s magnetickým poľom. Tieto podmienky sú charakteristické pre atmosféru Slnka a hviezd. V ďalšom kroku je potrebné tieto rovnice preformulovať podľa určitej numerickej schémy umožňujúcej priamy výpočet veličín. Následne je potrebné vytvoriť algoritmus a počítačový program realizujúci vlastný výpočet. Pretože v súčasnosti poznáme platné fyzikálne zákony a boli už vyvinuté účinné numericke schémy, úlohou astrofyzika je hlavne vytvoriť program a realizovať výpočet. Pri numerickejších výpočtoch je reálny spojité priestor nahradený sieťou s diskretnými uzlami s definovaným priestorovým krokom. Iba v nich sú vypočítané hodnoty fyzikálnych veličín so zvoleným časovým krokom. Hustota uzlov siete, časový krok a aj rozsah fyzikálnych zákonov za-

hrnutých do simulácií nie sú ľubovoľné, ale obmedzené výkonom počítačov. Výpočet je tým dlhší a náročnejší, čím je väčší objem priestoru pokrytého sieťou a menší krok medzi uzlami, čím dlhší časový interval pokrýva simulácia s kratším časovým krokom a čím presnejšia a úplnejšia forma fyzikálnych zákonov je zahrnutá do simulácie. Napríklad výpočet veľkoškálovej štruktúry pozorovaného vesmíru (takzvanej kozmickej pavučiny) prebiehal na jednom z najvýkonnejších počítačov na svete mesiac. Hoci už dnes máme k dispozícii počítačové simulácie vývoja prakticky všetkých známych astrofyzikálnych javov, objektov a štruktúr, vrátane Veľkého tresku, kóp galaxií, samotných galaxií a ich aktívnych jadier, čiernych dier, supernov, dvojhviezd, planét a planetárnych sústav, väčšina z nich je robená za silne zjednodušujúcich predpokladov. Napríklad v prípade Slnka a jeho atmosféry dokážeme korektne a detailne simulovať javy nanajvyš v kocke menšej ako $10^4 \times 10^4 \times 10^4$ km. Pripomeňme, že polomer Slnka je 696 000 km. Ideálom slnečnej fyziky je mať v počítači simulované celé Slnko, prípadne iné hviezdy, so všetkými známymi fyzikálnymi procesmi, štruktúrami, javmi a detailmi. Jeho naplnenie je však v nedohľadne a nie je vylúčené, že je to nesplniteľný sen.

Vízie blízkej a vzdialenej budúcnosti

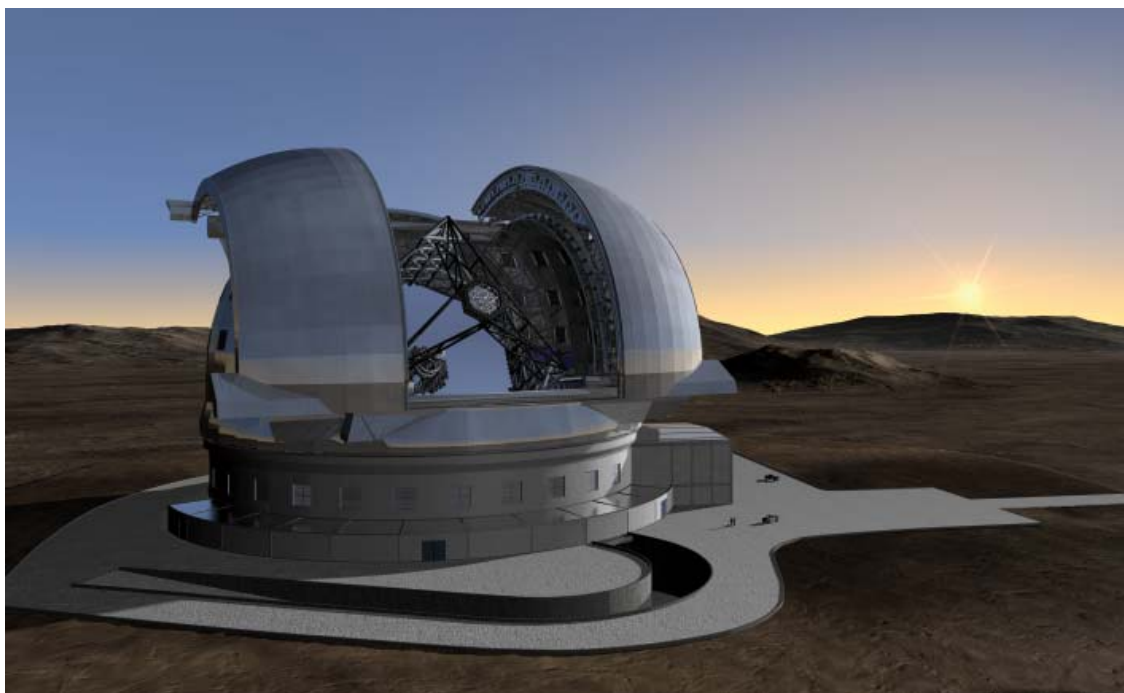
Vývoj nových astronomických prístrojov a metód je zameraný na riešenie najzákladnejších problémov a otázok vesmíru. K nim napríklad patrí vznik galaxií v raných štádiách vývoja vesmíru, stabilita a štruktúra medzihviezdnych molekulárnych mračien a vznik a formovanie hviezd a planét v týchto mračnách. K zodpovedaniu týchto a mnohých ďalších otázok má prispieť rádioteleskopická sieť ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), ktorej dokončenie je plánované na rok 2012. ALMA je sústava antén s vysokou citlivosťou a veľkým uhlovým rozlíšením. Po dokončení bude ALMA pozostávať z 54 antén s priemerom 12 metrov a 12 antén s priemerom 7 metrov. Všetky antény budú vybavené prijímačmi pre sedem frekvenčných pásiem s možnosťou doinštalovať prijímače pre ďalšie tri pásma, pokrývajú tak frekvencie v rozsahu od 30 do 950 GHz odpovedajúce vlnovým dĺžkam od 0,3 do 9,6 mm. Po dobudovaní bude ALMA dosahovať uhlové rozlíšenie približne 0,02 oblúkovej sekundy, čo je desaťkrát lepšie rozlíšenie ako má



Obr. 8 Výsledok simulácie veľkoškálovej štruktúry vesmíru a jeho vývoja uskutočnenej v rámci projektu Millennium Simulation. Svetlé vlákna reprezentujú kopy galaxií. Jasná štruktúra uprostred je superkopa galaxií. Tmavé dutiny medzi vláknami vyplňa tmavá hmota.

» Hoci už dnes máme k dispozícii počítačové simulácie vývoja prakticky všetkých známych astrofyzikálnych javov, objektov a štruktúr, väčšina z nich je robená za silne zjednodušujúcich predpokladov. «

» V roku 2010 by malo byť prijaté konečné rozhodnutie o umiestnení najväčšieho pozemského optického a infračerveného teleskopu EELT. «



Obr. 9 Európsky extrémne veľký teleskop EELT (European Extremely Large Telescope) s predpokladaným priemerom zrkadla 42 m podľa predstáv grafika.

Hubbleov kozmický teleskop. ALMA je budovaná na náhornej púštnej plošine Llano de Chajnantor v nadmorskej výške 5000 m v severnom Chile. Táto lokalita bola zvolená kvôli veľmi nízkemu obsahu vodných pár, ktoré absorbujú kozmické milimetrové a submilimetrové žiarenie. Vo všeobecnosti ALMA bude zameraná na výskum chladného vesmíru, ktorý emituje práve milimetrové a submilimetrové elektromagnetické žiarenie nesúce informáciu o kozmických počiatkoch galaxií, hviezd, planét a možno aj života. Na plošine Chajnantor je už v prevádzke jednoanténový rádioteleskop APEX (Atacama Pathfinder EXperiment), ktorý je prototypom antén budúcej siete ALMA. APEX má hneď dve naj. Momentálne je s priemerom parabolickej antény 12 m najväčším rádioteleskopom pre submilimetrovú oblasť na južnej pologuli. Druhým naj je jeho kamera LABOCA (The Large Apex BOLometer CAmera) s najväčším bolometrickým detektorom pozostávajúcím z 295 pixelov. Bolometer je neselektívny detektor tepelného žiarenia využívajúci závislosť elektrického odporu na teplote.

Ďalším veľkým astronomickým prístrojom blízkej budúcnosti bude kozmický teleskop James Webb (JWST). Ten bude nástupcom Hubbleovho kozmického teleskopu (HST), ktorého ukončenie činnosti je predpokladané v rokoch 2013 alebo 2014. JWST nesie meno Jamesa Webba, ktorý stál na čele NASA v šesťdesiatych rokoch 20. storočia v čase projektu Apollo. JWST bude mať berýliové zrkadlo o priemere 6,5 m pokryté zlatom. Súvisí to s tým, že na rozdiel od HST bude JWST pozorovať vesmír v infračervenej oblasti v rozsahu vlnových dĺžok od 600 nm do 28 mikrometrov. Z priestorových dôvodov umiestnenia zrkadla do nákladného priestoru nosnej rakety je zrkadlo zložené z 18 šesťhranných segmentov. Zrkadlo bude v trupe rakety zložené na tri časti a v kozme sa automaticky rozvinie ako leporelo. Segmenty a časti zrkadla nastavia do správnej polohy sústava senzorov. JWST by mal byť vypustený na obežnú dráhu v roku 2014 a bude umiestnený do Lagranžovho bodu L2 za dráhou Mesiaca vo vzdialenosti 1,5

milióna kilometrov od Zeme. Súčasťou konštrukcie JWST je tepelný štít, ktorý má blokovať vplyv žiarenia Slnka, Zeme a Mesiaca na prístroje JWST. Podobne ako ALMA aj JWST bude skúmať počiatky formovania galaxií v raných štádiách vývoja vesmíru ako aj vznik hviezd a planét v chladných medzihviezdnych mračnách.

V roku 2010 by malo byť prijaté konečné rozhodnutie o umiestnení najväčšieho pozemského optického a infračerveného teleskopu EELT (European Extremely Large Telescope). Tento gigant bude mať primárne zrkadlo o priemere 42 metrov zostavené z 906 šesťhranných segmentov. Sekundárne zrkadlo bude mať priemer 6 metrov a celá optická sústava EELT spolu so zrkadlami adaptívnej optiky bude pozostávať z piatich zrkadiel. Deformovateľné zrkadlo adaptívnej optiky bude mať priemer 2,5 metra a jeho plochu bude meniť 5000 piezoelektrických piestov. Začiatok činnosti teleskopu je plánovaný na rok 2018. Najzaujímavejšie vedecké ciele EELT sú priame meranie zrýchľovania expanzie vesmíru meraním rýchlosti galaxií a kvazarov v priebehu 20 rokov a hľadanie Zemi podobných planét v obývatelných zónach materských hviezd.

Poznámka

Článok vznikol na základe autorovej prednášky prezentovanej v rámci Celoslovenského astronomického seminára pre učiteľov, ktorý sa uskutočnil v Astronomickom ústave Slovenskej akadémie vied v Tatranskej Lomnici 23.–25. apríla 2009. V *Zborníku prednášok z Celoslovenského astronomického seminára pre učiteľov – 2009* bol tento článok po viacerých úpravách zostavovateľmi zborníka uverejnený na stranách 7 až 18.

Literatúra

- [1] P. Kulhánek, P. Břichnáč: „Velké dalekohledy světa,“ *Astropis* 1, 7 (2001). www.aldebaran.cz/~kulhanek/texts/2001_Astropis_dalekohledy.pdf.
- [2] J. Palouš: „Česká republika v Evropské jižní observatoři,“ *Čs. čas. fyz.* 59, 311 (2009).