

MODERNÉ PRÍSTROJE A METÓDY ASTRONOMICKÉHO VÝSKUMU

Mgr. Július Koza, PhD.

koza@astro.sk

Astronomický ústav SAV, 059 60 Tatranská Lomnica

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 rádiodalekohľadov v polovici 20. storočia prestal byť optický ďalekohľad vynájdený práve pred štyristo rokmi jediným prostriedkom poznávania vesmíru. Odvtedy astrofyzici umiestnili svoje špeciálne ďalekohľady 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 jadrách 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 astronómiu a astrofyziku 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 (Pribulla 2007), 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 snažiace sa zachytiť dokonca 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 fenoménom 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 (A Science Vision for European Astronomy). Tieto otázky a hľadanie možných odpovedí sú intenzívne vnímané aj širokou verejnosťou.

Tento príspevok predstavuje vybrané prístroje a metódy, ktoré využíva moderná astronómia a astrofyzika. Pretože sa jedná o tematicky veľmi rozsiahlu oblasť, nemôže byť považovaný ani zďaleka za jej úplné pokrytie, ktoré snáď ani nie je možné. Jedná sa skôr o pokus úsporne zachytiť hlavné znaky a reprezentantov toho, čo je dnes považované za moderné astronomické prístroje a metódy s krátkym presahom do blízkej budúcnosti. Výber prístrojov a metód je kompromisom poznačeným profesionálnym zameraním autora na fyziku Slnka v najlepšej snahe zachovať všeobecnejšiu platnosť vybraných vzoriek. Príspevok môže slúžiť ako doplnkové čítanie žiakom ZŠ a študentom SŠ s hlbším záujmom o astronómiu a astrofyziku.

Multispektrálny výskum a kozmické observatóriá

Svetlo s vlnovou dĺžkou od 400 do 760 nm je len veľmi úzkym úsekom celého spektra elektromagnetického žiarenia vysielaťého kozmickými objektmi (obr. 1). 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 spektrálnym oblastiam. Tie boli sprístupnené až s nástupom kozmickej techniky umožňujúcej vyniesť ultrafialové, röntgenové a gama ďalekohľady mimo atmosféru Zeme. Výhody kozmického vákuu využili aj optické a infračervené ďalekohľady na čele s Hubbleovým a Spitzerovým kozmickým ďalekohľadom. Druhý z nich bude mať v blízkej budúcnosti hneď dvoch modernejších a väčších nástupcov v podobe kozmických ďalekohľadov Herschel a James Webb.

Okrem výhod, akými sú odstránenie rušivého vplyvu atmosféry Zeme na pozorovania, prístup ku krátkovlnným oblastiam spektra a eliminovanie pozorovacích medzier spôsobených striedaním dňa a noci, však kozmické prostredie stavia aj nové obmedzenia. Hlavným je limitovaný priemer zrkadiel ďalekohľadov, 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 rekordérmí Hubbleov kozmický ďalekohľad vypustený na obežnú dráhu Zeme v roku 1990 a Slnečné heliosférické observatórium SOHO (obr. 3), ktoré je v činnosti od roku 1995 prežijúc aj krátky výpadok v roku 1998. V prípade kozmických ďalekohľadov pre mikrovlnnú a infračervenú oblasť limituje ich životnosti zásoba chladiaceho média, najčastejšie tekutého hélia. Napríklad predpokladaná životnosť spomenutého infračerveného ďalekohľadu Herschel bude okolo tri a pol roka a v prípade nového mikrovlnného ďalekohľadu Planck len pätnásť mesiacov.

Súčasný astrofyzik skúmajúci povedzme aktívne jadro galaxie kombinuje rádiovú emisiu jadra, infračervené pozorovania plynno-prachovej zložky galaxie s optickou snímkom 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 kôp galaxií a veľkoškálovej štruktúry vesmíru. Toto si vyžaduje nasadenie viacerých pozemských a kozmických ďalekohľadov a je to väčšinou kolektívna práca, do ktorej býva zapojených viacero členov výskumného tímu. Simultánnosť pozorovaní všetkých uvedených ďalekohľadov v tom istom čase nie je v tomto prípade nevyhnutnou. Tá je naopak mimoriadne dôležitou pri výskume javov ako gama záblesky, vzplanutia kataklizmických hviezd, nov a supernov. Prvý zo spomenutých javov trvá tak krátko, že kozmický gama ďalekohľad automaticky po jeho zachytení vysiela údaje o polohe záblesku veľkému pozemskému optickému ďalekohľadu, 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 erupčných javov v nej si vyžaduje simultánne multispektrálne pozorovania s veľkým spektrálnym, časovým a priestorovým rozlíšením (obr. 2 a 3). 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 rádiovnej oblasti spektra. Vákuový vežový ďalekohľad VTT (obr. 2) umožňuje simultánnu spektroskopiu, polarimetriu a snímkovanie slnečnej fotosféry a chromosféry vo viacerých oblastiach vizuálnej a blízkej infračervenej oblasti 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 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 (Kučera 2007, Rušin 2008). Pre adekvátny výskum týchto vrstiev sú však nevyhnutné pozorovania z kozmických slnečných observatórií (obr. 3). 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 (obr. 3). 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 ďalekohľady

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 Slnečnej sústavy), druhu žiarenia (rádióďalekohľady, infračervené, optické, ultrafialové, röntgenové, gama ďalekohľady) prípadne druhu skúmaných elementárnych častíc (neutrína, elementárne častice). Do zvláštnej skupiny by patrili detektory gravitačných vĺn a Čerenkovovho žiarenia. Tento krátky zoznam nie je ani zd'aleka 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 ďalekohľady. V tabuľke 1 je zoznam najväčších optických ďalekohľadov s priemerom primárneho zrkadla viac ako 8 m, ktoré sú v čase písania tohto príspevku v plnej prevádzke alebo krátko pred dokončením ako napríklad Grantecan a LBT. Jedným z hlavných kritérií pri výbere lokality umiestnenia veľkých ďalekohľadov je kvalita astroklímy. Pod týmto pojmom rozumieme čo najväčší počet jasných nocí v roku, suchú a priesvitnú atmosféru s čo možno najmenšou turbulenciou vzduchu. Týmto požiadavkám najlepšie vyhovujú napríklad púšte v podhorí Ánd v Čile, 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 efektívne využitie 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 zrkadla a tenké meniskové zrkadlá. Plocha segmentových zrkadiel pripomína mozaiku zostavenú z menších a ľahkých šesťhranných zrkadiel. Napríklad zrkadlá ďalekohľadov 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 Shack-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.

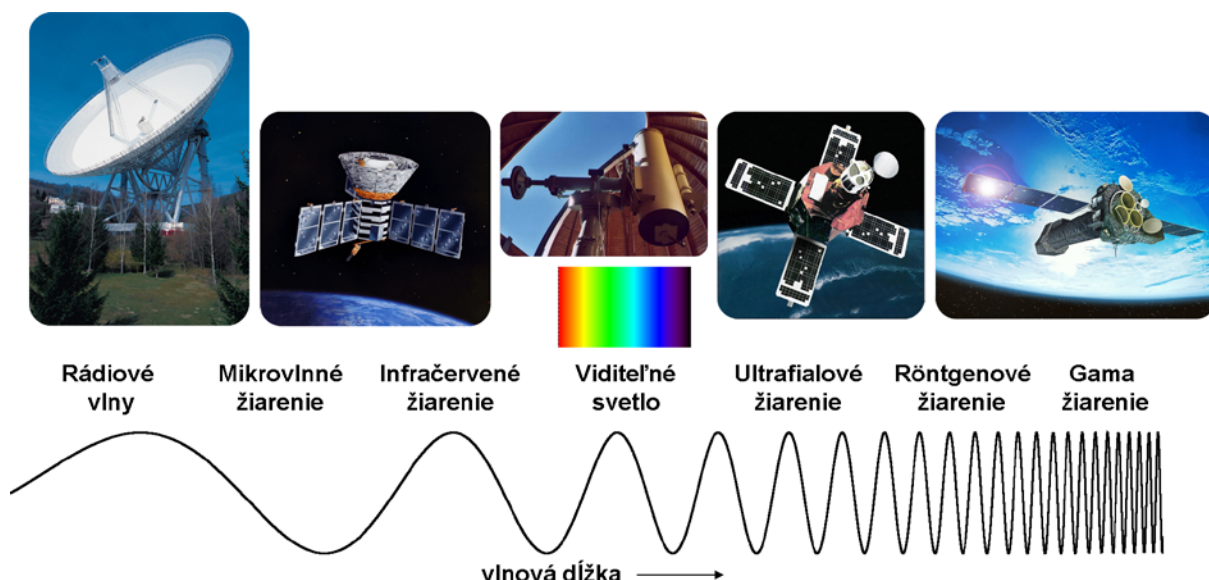
Moderné optické ďalekohľady sú často budované vo vybraných lokalitách blízko seba. To je prípad štvorice ďalekohľadov VLT, dvojice Keck I a II a LBT (tabuľka 1). Ďalekohľady tak môžu pozorovať nezávisle rôzne objekty alebo ten istý objekt a ich svetlo môže byť privedené do jedného spoločného ohniska. Tým je možné dosiahnuť podstatne vyššiu uhlovú rozlišovaciu schopnosť ako pri použití jedného ďalekohľadu a spojené ďalekohľady pracujú ako veľký interferometer. Napríklad VLTI (VLT interferometer) spája všetky štyri 8,2-m ďalekohľady VLT je ekvivalentom ďalekohľadu s priemerom zrkadla 200 m. VLTI tak môže dosiahnuť v blízkej infračervenej oblasti spektra vo vlnovej dĺžke 1 mikrometer uhlové rozlíšenie až 1 milisekundu, čo zodpovedá dĺžke 2 m videnej vo vzdialenosti Mesiaca.

Pozorovací čas veľkých ďalekohľadov 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 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 ďalekohľad, 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 ďalekohľadov VLT. Vo výnimočných prípadoch je to až sedem nocí. Ak je pozorovacia kampaň úspešná, astronóm počas týchto niekoľko nocí získava také veľké množstvo pozorovacích dát, že ich 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 *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 ďalekohľadoch závisí aj od publikovaných výsledkov získaných na základe pozorovacích dát z veľkých ďalekohľadov.

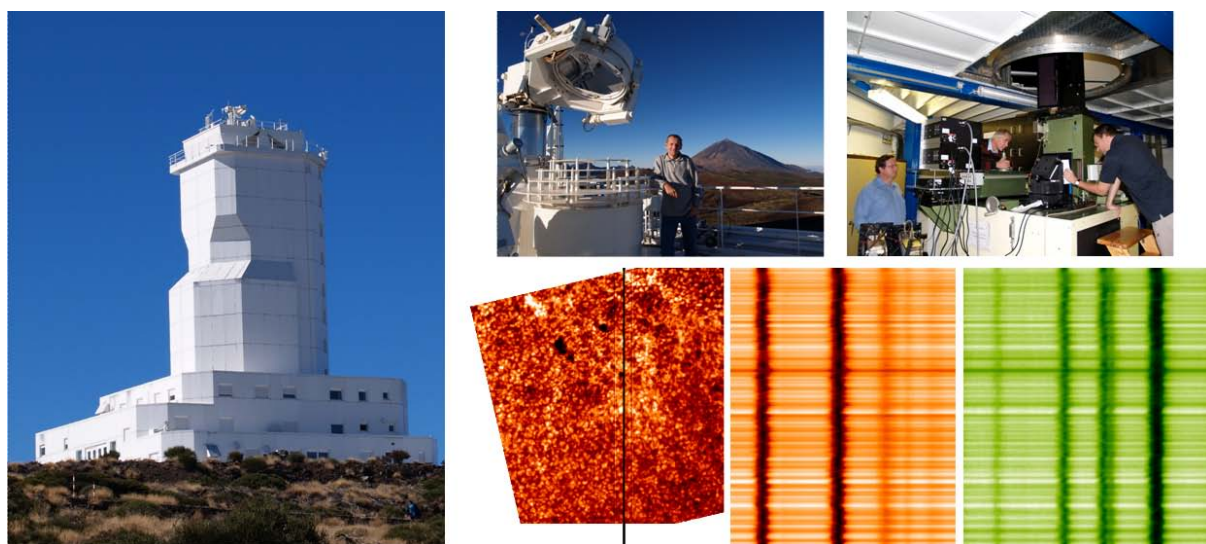
Adaptívna optika

Zemská atmosféra veľmi nepriaznivo vplyva na kvalitu astronomických pozorovaní. Turbulentné vlnenie vzduchu je dôsledkom teplotných nehomegenít – rýchlo sa pohybujúcich bublín teplejšieho a chladnejšieho vzduchu. Bubliny 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*.

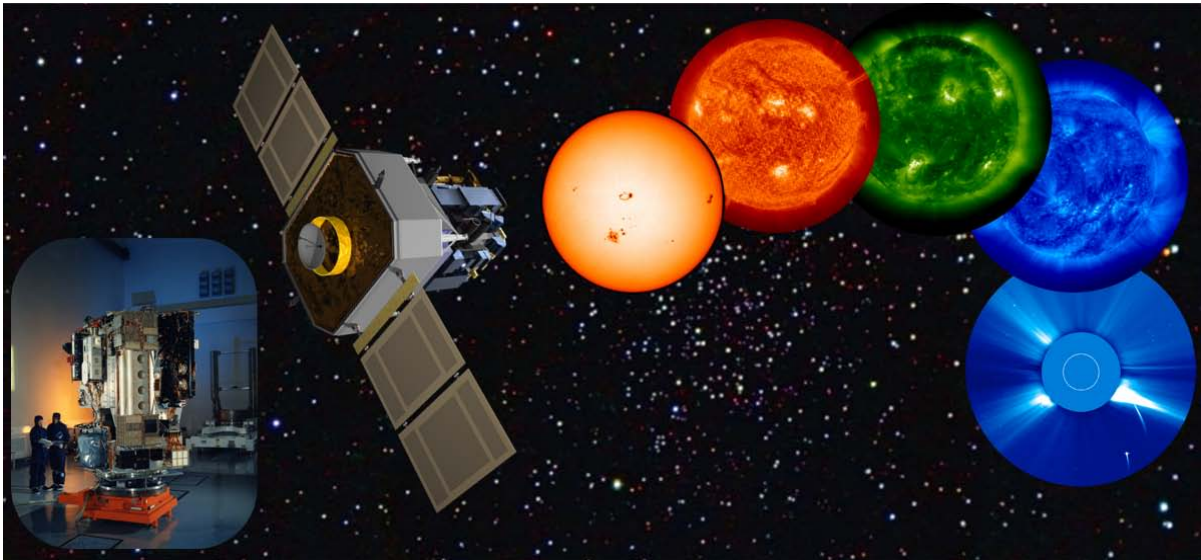
Na eliminovanie vplyvu *seeingu* na kvalitu obrazu bol vyvinutý systém označovaný ako adaptívna optika. Jeho základnými prvkami sú analyzátor poškodenia svetelnej vlnoplochy (najčastejšie tzv. Shack-Hartmannov senzor), malé náklonné a deformovateľné zrkadlá uložené na sústave piezoelektrických piestov. Senzor pozostáva zo sústavy miniatúrnych šošoviek vytvárajúcich obraz referenčného zdroja na svetlocitlivých 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 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



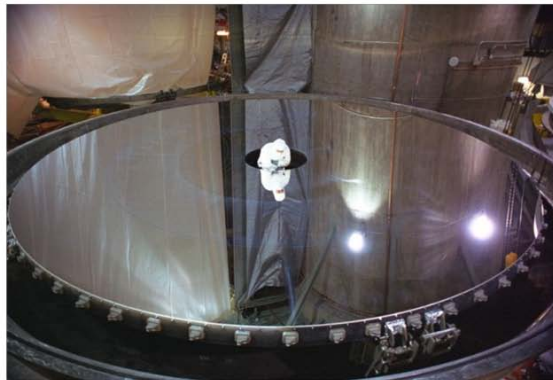
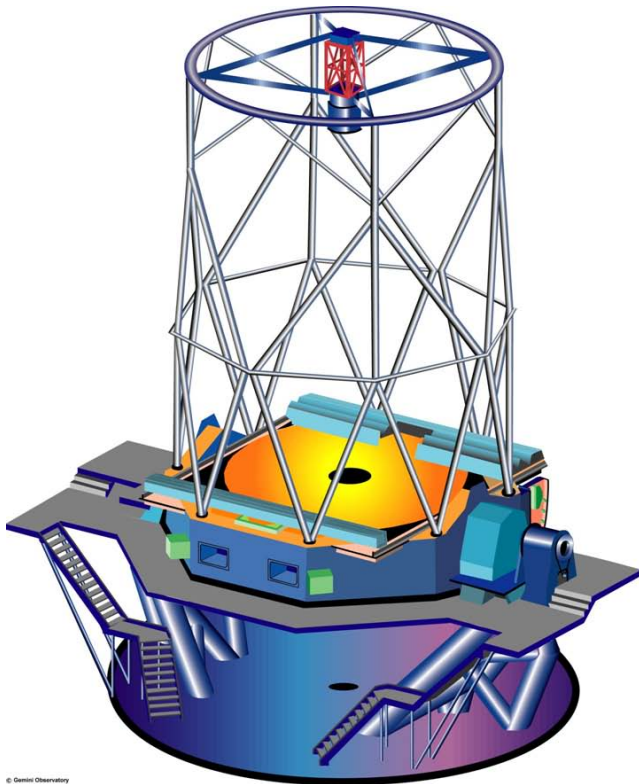
Obr. 1: Spektrum elektromagnetického žiarenia astronomických objektov a prostriedky jeho detekcie. *Zľava*: Rádiod ďalekohľad Effelsberg, satelit COBE (COsmic Background Explorer), Newtonov optický reflektor, kozmické observatóriá TRACE (Transition Region And Coronal Explorer) a XMM-Newton (X-ray Multi-Mirror Mission).



Obr. 2: *Vľavo*: Vákuový vežový ďalekohľad VTT na ostrove Tenerife je príkladom moderného slnečného ďalekohľadu s veľkým vertikálnym spektrografom siahajúcim hlboko pod povrch terénu. *Hore uprostred*: Zrkadlo coelostat na vrchole VTT a vstupné okno privádzajúce slnečné svetlo do vákuového tanku ďalekohľadu dolu. *Hore vpravo*: Príprava moderného spektroskopického pozorovania na VTT. *Dolu*: Granulácia a pór v slnečnej fotosfére (vľavo). Vertikálna čiara znázorňuje polohu štrbiny spektrografu počas pozorovania. Ukážky slnečných spektier s veľkým spektrálnym a priestorovým rozlíšením (vpravo). Tmavé vertikálne pásy sú spektrálne čiary. Väčšina z nich patrí železu.



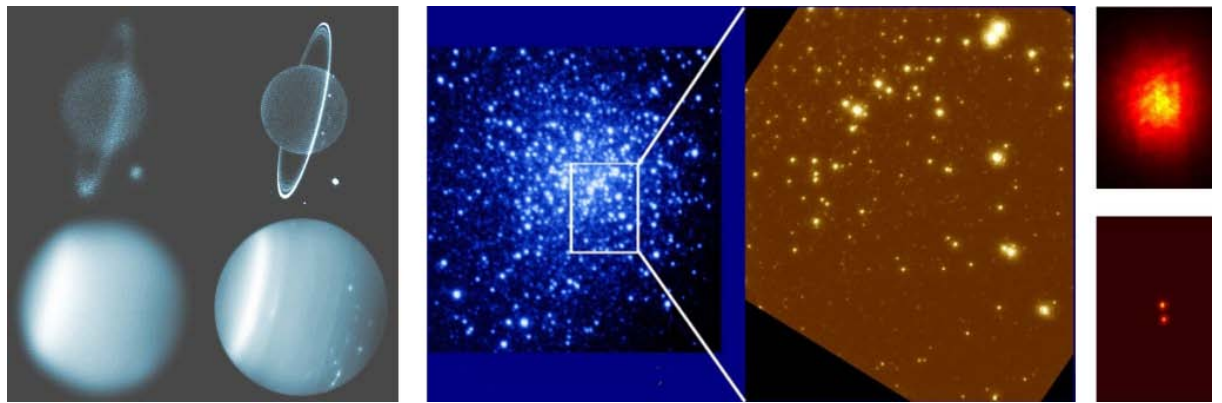
Obr. 3: Slnčné kozmické observatórium SOHO umožňuje moderný komplexný výskum Slnka, ktorý by bol z povrchu Zeme nemysliteľný. SOHO nesie sadu prístrojov, ďalekohľadov a koronagrafov určených pre výskum oscilácií viditeľného povrchu Slnka, horúcej koróny žiariacej v ultrafialovej oblasti spektra, výronov koronálnej hmoty a slnečného vetra. Vľavo je SOHO počas konštrukcie.



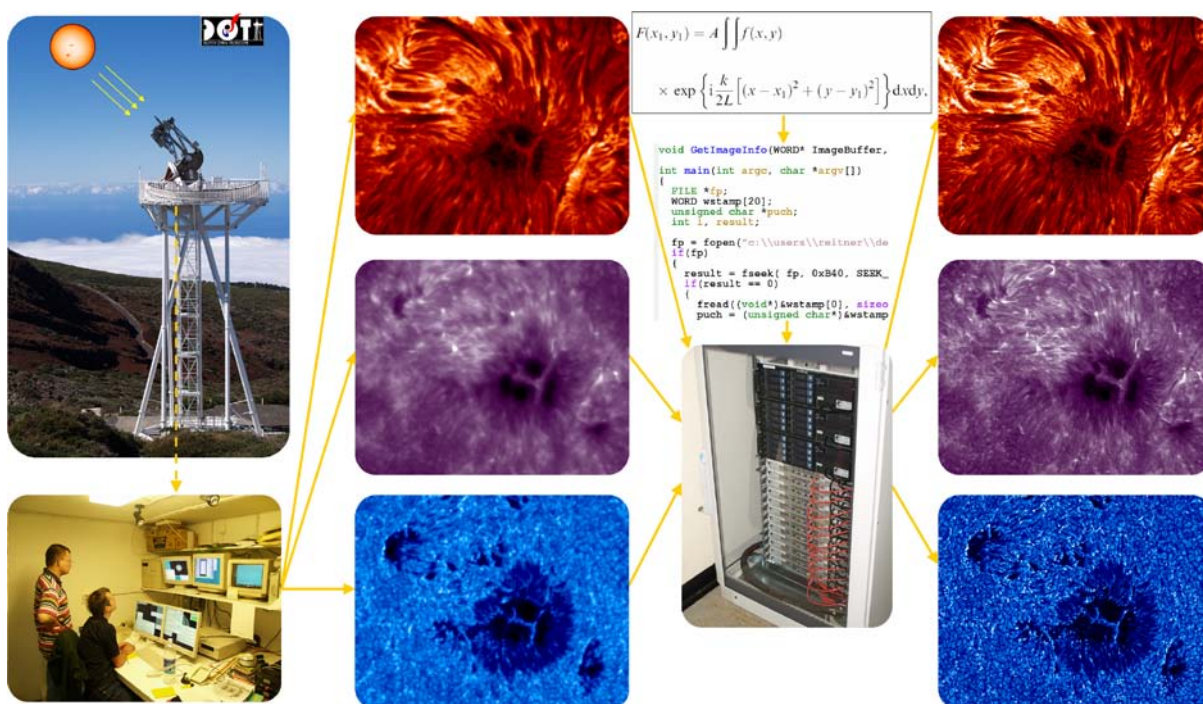
Obr. 4 Vľavo: Rámová konštrukcia a altazimutálna montáž ďalekohľadu Gemini s priemerom primárneho zrkadla 8,1 m. Vpravo hore: Otvorená kupola ďalekohľadu Gemini. Vpravo dole: Primárne zrkadlo ďalekohľadu po pokovaní. Uprostred je technik kontrolujúci kvalitu pokovania.



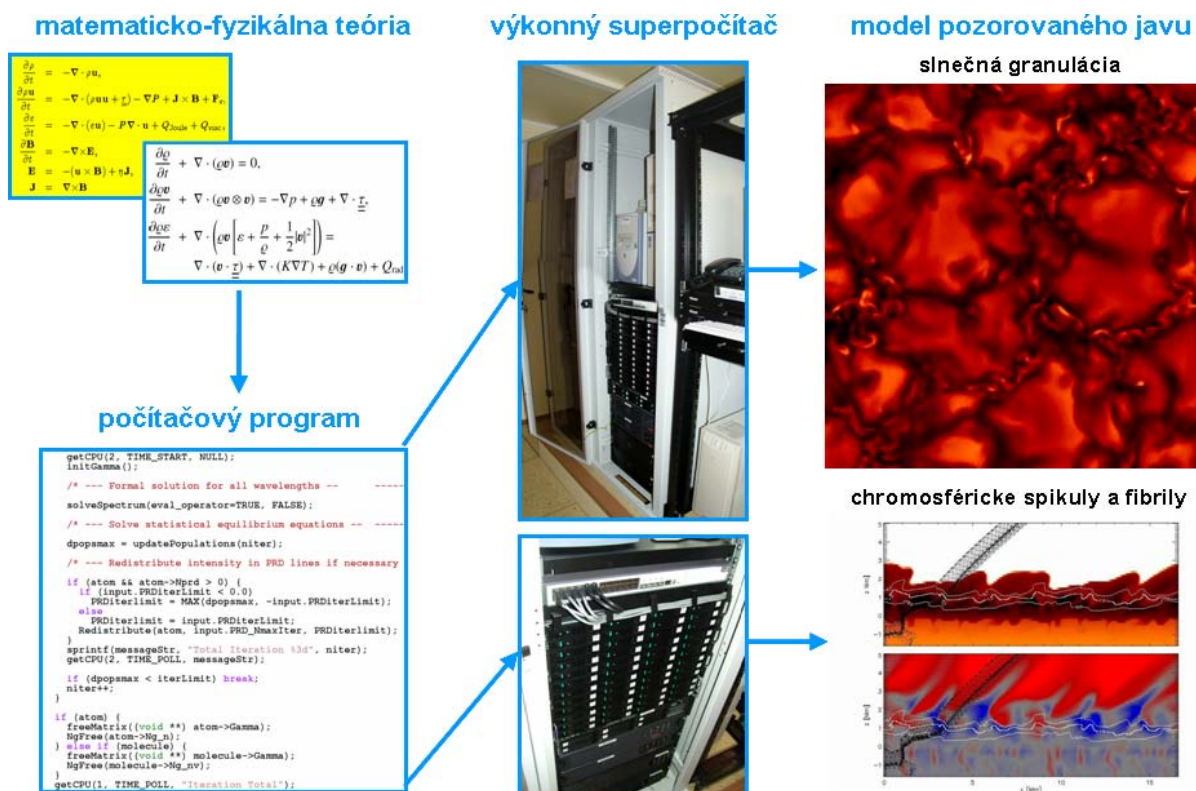
Obr. 5 *Vľavo*: Princíp adaptívnej optiky využívajúcej umelú hviezdu vytvorenú laserom. *Uprostred*: Lúč laseru adaptívnej optiky ďalekohľadu Gemini počas pozorovania. *Vpravo*: Kupola ďalekohľadu Keck s lúčom laseru adaptívnej optiky v činnosti. Lúče sú voľným okom neviditeľné a zachytí ich len snímka s dlhým expozičným časom.



Obr. 6 *Vľavo*: Urán v infračervenom žiarení v pásme $1,6\ \mu\text{m}$ (dolu) a $2,2\ \mu\text{m}$ (hore), v ktorom je vidieť sústava prstencov okolo planéty a niektoré z jeho mesiacov. Snímky získal ďalekohľad Keck 9. júla 2004 bez adaptívnej optiky (vľavo) a s adaptívnou optikou (vpravo). *Uprostred*: Snímka guľovej hviezdokopy získaná ďalekohľadom Gemini bez adaptívnej optiky (vľavo) a snímka centrálnej oblasti guľovej hviezdokopy získaná pomocou adaptívnej optiky (vpravo). *Vpravo*: Veľmi zväčšený obraz zdanlivo osamelej hviezdy rozmazaný atmosférou Zeme na škvŕnu (hore). Snímka bola získaná bez adaptívnej optiky. Použitie adaptívnej optiky odhalilo, že škvŕna zdanlivo osamelej hviezdy ukrýva v skutočnosti tesnú dvojhviezdu (dole).



Obr. 7: Ukážka moderného procesu získavania astronomických pozorovaní. Na snímke je Holandský otvorený ďalekohľad DOT a jeho riadiaca miestnosť, kde prebieha multispektrálne pozorovanie slnecnej škvrny v rôznych spektrálnych oblastiach pokrývajúcich fotosféru (modrá snímka) a chromosféru (fialová a červená snímka).



Obr. 8: Počítačová numerická simulácia pozorovaného javu ako príklad modernej astronomickej metódy aplikujúcej matematicko-fyzikálnu teóriu pri interpretácii pozorovaní. Na snímkach vpravo sú výsledky numerických simulácií slnecnej granulácie, magnetokonvekcie, fibríl a spikul.

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 ďalekohľady
Veľký juhoafrický ďalekohľad SALT	~ 10 m	Juhoafrická republika, len pre spektroskopiu
Hobby-Eberly ďalekohľad HET	9,2 m	Texas, sférické zrkadlo len pre spektroskopiu
Veľký binokulárny ďalekohľad LBT	8,4 m	Arizona, pár zrkadiel ekvivalentný 11,8 m
Subaru	8,3 m	Havajské ostrovy, Subaru patrí Japonsku
Veľmi veľký ďalekohľad VLT	8,2 m	Čile, štvorica rovnakých ďalekohľadov
Gemini Sever (Gillett)	8,1 m	Havajské ostrovy, dvojica Gemini Juh
Gemini Juh	8,1 m	Čile, dvojica Gemini Sever

Tabuľka 1: Prehľad deviatich najväčších pozemských optických ďalekohľadov s priemerom primárnych zrkadiel nad 8 m. Žltá podfarbená štvorica sú ďalekohľady so segmentovými primárnymi zrkadlami. Zeleno podfarbené sú ďalekohľady s tenkými kompaktnými zrkadlami.

jasnejšia hviezda v blízkosti pozorovaného objektu (hmloviny, hviezdokopy, galaxie). Súčasné systémy adaptívnej optiky však dokážu 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 (obr. 5). Tento systém adaptívnej optiky je doplnený o malý vysielací reflektor pripevnený k hlavnému ďalekohľadu najčastejšie na opačnej strane držiaka sekundárneho zrkadla. Z laseru o výkone niekoľko wattov umiestneného mimo hlavného ďalekohľadu je optickým vláknom privedený laserový lúč do ohniska vysielacieho ďalekohľadu. 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 Zeme, ktoré sú pozostatkom po rozpade 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 ďalekohľady 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 oblúková sekunda. Vo vizuálnej oblasti je prínos adaptívnej optiky o niečo menší. Napríklad snímka guľovej hviezdokopy (obr. 6) získaná bez adaptívnej optiky má rozlíšenie 0,6 oblúkovej sekundy zatiaľ čo vedľajšia snímka získaná s podporou adaptívnej optiky má rozlíšenie 90 oblúkových milisekúnd.

Rekonštrukcia obrazu

Adaptívna optika významne redukuje poškodenie obrazu spôsobené atmosférickým seeingom, no nedokáže úplne odstrániť všetky reziduálne kazy 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 ďalekohľadu (obr. 7), ktorého multispektrálne pozorovania Slnka sú spracovávané prvou z ďalej spomenutých počítačových rekonštrukčných metód. V astronomickej praxi sú najpoužívanjšie metódy takzvanej škvrnkovej rekonštrukcie a viacsnímkovdej dekonvolúcie (voľne skrátený 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 ktorého, obrazne povedané, seeing *zamrzne*. Tomuto faktu 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 expozičným časom typicky 10 milisekúnd. Snímka salvy s najvyšším kontrastom je považovaná za referenčnú slúžiacu 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 popísané ako konvolúcia, t.j. špeciálny integrál, obrazu s priestorovo nezávislou rozptylovou funkciou (voľný preklad z angl. Point Spread Function). Vďaka tomu je možné snímku rozložiť na menšie polia, ktoré sú ďalej rekonštruované. Nakoľko sa jedná o matematicky veľmi náročnú a rozsiahlu problematiku siahajúcu ďaleko mimo rámec nášho príspevku, ukončíme túto kapitolu konštatovaním, že počítačová rekonštrukcia obrazu je nevyhnutná pre dosiahnutie maximálneho rozlíšenia moderných ďalekohľadov. 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 ďalekohľad v kozme bez rušivého vplyvu atmosféry.

Numerické 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 numerické simulácie (obr. 8). Tie v istom slova zmysle umožňujú robiť počítačové experimenty s astrofyzikálnymi javmi v podmienkach, ktoré nie je možné vytvoriť v laboratóriu. Numerické simulácie tak umožňujú reprodukovať javy astronomických rozmerov a extrémnych fyzikálnych podmienok. Východným bodom je matematicko-fyzikálna teória o ktorej predpokladáme, že správne popisuje daný jav. Takou je napríklad sústava diferenciálnych vektorových rovníc

magnetohydrodynamiky (obr. 8) popisujúcich správanie ionizovaného plynu (plazmy) v prostredí s magnetickým poľom. Tieto podmienky sú charakteristické pre atmosféru Slnka a hviezd. V ďalšom kroku, vynechanom na obr. 8, 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 numerické schémy, úlohou astrofyzika je hlavne vytvoriť program a realizovať výpočet. Pri numerických výpočtoch je reálny spojitý 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 zahrnutých 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, kôp 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 nanajvýš 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 detailami. 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 ním napríklad patrí vznik galaxií v ranných štádiách vývoja vesmíru, stabilita a štruktúra medzihviezdnych molekulárnych mračien a vznik a formovanie hviezd a planét v týchto mračnách (A Science Vision for European Astronomy). K zodpovedaniu týchto a mnohých ďalších otázok má prispieť ďalekohľad ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), ktorého dokončenie je plánované na rok 2012. Ďalekohľad ALMA (obr. 9) 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 pokrývajúce tak frekvencie v rozsahu od 30 do 950 GHz zodpovedajúce 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 Hubbleov kozmický ďalekohľad. ALMA je budovaná na náhornej púštnej plošine Llano de Chajnantor v nadmorskej výške 5000 m v severnom Čile. 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.

Ďalším veľkým astronomickým prístrojom blízkej budúcnosti bude kozmický ďalekohľad James Webb (JWST). Ten bude nástupcom Hubbleovho kozmického ďalekohľadu (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 nastaví do správnej polohy sústava senzorov. JWST by mal byť vypustený na obežnú dráhu v roku 2014 a bude umiestnený do Lagrangeovho bodu L2 za dráhou Mesiaca vo vzdialenosti 1,5 milióna kilometrov od Zeme. Súčasťou konštrukcie JWST je tepelný štít (obr. 9), ktorý má blokovať vplyv žiarenia Slnka, Zeme a Mesiaca na prístroje JWST. Podobne ako ALMA, aj JWST bude skúmať počiatky formovania galaxií v ranných 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 ďalekohľadu EELT (European Extremely Large Telescope). Tento gigant (obr. 9) 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 ďalekohľadu 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 obývateľných zónach materských hviezd.

Odporúčaná literatúra:

- Kučera, A., 2007: Dynamické Slnko a slnečno-zemské vzťahy, zborník prednášok: Celoslovenský astronomický seminár pre učiteľov - 2007, Tatranská Lomnica, 4. - 6. október 2007, zostavili: J. Rybák, J. Svoreň, vydal: Astronomický ústav SAV, str. 7
- Pribulla, T., 2007: Planéty mimo Slnečnej sústavy - extrasolárne planéty, zborník prednášok: Celoslovenský astronomický seminár pre učiteľov - 2007, Tatranská Lomnica, 4. - 6. október 2007, zostavili: J. Rybák, J. Svoreň, vydal: Astronomický ústav SAV, str. 57
- Rušin, V., 2008: Slnečná koróna a zatmenia Slnka, zborník prednášok: Celoslovenský astronomický seminár pre učiteľov - 2008, Tatranská Lomnica, 4. - 6. december 2008, zostavili: J. Rybák, J. Svoreň, vydal: Astronomický ústav SAV, str. 67
- A Science Vision for European Astronomy, editors: P. T. de Zeeuw and F. J. Molster, ASTRONET 2007, ISBN 978-3-923524-62-4.