

Moderní sluneční dalekohledy

M. Sobotka, Astronomický ústav AV ČR v.v.i., Ondřejov, ČR, msobotka@asu.cas.cz

Abstrakt

Přehled shrnuje základní informace o velkých optických slunečních dalekohledech určených pro vysoké prostorové a spektrální rozlišení a o postfokálních zařízeních, která analyzují zachycené světlo. Stručně představuje klasické dalekohledy 20. století (DST, VTT, Themis, SST a DOT) spolu s novou generací přístrojů, které již pracují (HINODE/SOT, NST, NVST, GREGOR) nebo jsou ve výstavbě/vývoji (ATST, NLST, EST a Solar-C/SUVIT).

1. ÚVOD

V tomto stručném přehledu se zaměříme na velké optické sluneční dalekohledy, které jsou určeny pro vysoké prostorové, časové a spektrální rozlišení. Opomineme tak řadu zajímavých přístrojů určených k synoptickým pozorováním Slunce, sluneční koróny apod., které jsou mimo rámec našeho článku a zasloužily by si svůj samostatný přehled.

Dalekohledy, kterými se budeme zabývat, mají velký průměr objektivu (řekněme více než 40 cm) a poměrně malé zorné pole, jen několik obloukových minut. Požadujeme od nich úhlové rozlišení podstatně lepší než 1", tedy přibližně 50–200 km na povrchu Slunce, schopnost nepřetržitě snímat s kadencí několika obrázků za sekundu a analyzovat i úzké a slabé spektrální čáry.

Velký průměr vstupního otvoru je právě důsledkem těchto požadavků – nejen, že difrakční mez rozlišení musí být co nejmenší, ale dalekohled musí zachytit dostatek fotonů, aby poměr signálu k šumu byl dostatečný (zhruba kolem 100) i při velmi krátkých expozičních dobách. To však s sebou nese problém: tok slunečního záření na povrchu Země je vyšší než jeden kW/m² a velká sběrná plocha objektivu zachycuje spoustu „zbytečné“ energie (vně zorného pole a ve spektrálních oblastech, které právě nepoužíváme), která ohřívá dalekohled. Proto velké sluneční dalekohledy zpravidla mají v primárním ohnisku důkladně chlazenou clonu, která vymezuje zorné pole a odráží přebytečné záření ven z dalekohledu. Záření, které projde clonou, je zpracováváno v různých postfokálních zařízeních (spektrografech a filtrech) a nakonec je zachyceno plošnými polovodičovými detektory.

2. TYPY DALEKOHLEDŮ A JEJICH VÝHODY

Typy velkých slunečních dalekohledů můžeme rozdělit podle umístění, optického systému, polohy primárního ohniska a konstrukce tubusu.

a) Umístění: pozemní nebo v kosmu.

Dalekohled umístěný v kosmu má obrovskou výhodu v tom, že pozoruje mimo atmosféru Země. To jednak umožňuje využít plný rozsah elektromagnetického spektra, jednak chybí rušivý vliv turbulentního ovzduší, které způsobuje pohyb, deformaci a rozostření obrazu. Na druhé straně, pozemní dalekohledy se mohou postavit podstatně větší a s mnohem menšími náklady, dají se přizpůsobit aktuálním požadavkům vědeckého programu a jsou snadno opravitelné.

b) Optický systém: reflektor nebo refraktor.

Průměr zrcadla reflektoru může být větší než 1 m, což je už po dlouhou dobu technický limit pro průměr čočkového objektivu. Navíc, protože zrcadlo je upevněno nejen podél obvodu, ale i na své zadní straně, opory mohou být aktivní a v reálném čase upravovat tvar zrcadla tak, aby bylo dosaženo optimálních optických vlastností. Refraktory jsou však vhodné pro vakuovou konstrukci tubusu, kdy objektiv může hrát roli vstupního okna, a většinou mají méně optických prvků, což zvyšuje propustnost dalekohledu.

c) Poloha primárního ohniska: v ose nebo mimo osu.

Pokud leží primární ohnisko v ose vstupního svazku, je minimalizována přístrojová polarizace způsobená šikmým dopadem. Takové přístroje jsou vhodné k přesnému měření magnetického pole. Na druhé straně, uspořádání mimo osu má výhodu vstupního otvoru bez středového zastínění, nižšího rozptýleného světla a více místa kolem primárního ohniska, což se hodí při technickém řešení chladicího systému.

d) Konstrukce tubusu: otevřená nebo uzavřená.

Uzavřená konstrukce je technicky náročnější, umožňuje však vyčerpání z tubusu dalekohledu vzduch nebo ho nahradit lehčím plynem, což odstraní nebo sníží vnitřní turbulenci v dalekohledu a zvýší kvalitu obrazu. Otevřená konstrukce má výhody větších

rozměrů, snadnějšího provedení a nepřítomnosti vstupního a výstupního okna. Kvalita obrazu je však závislá na vnějších podmínkách, zvláště na nutnosti laminárního proudění, větru, který vyrovnává rozdíly teplot v dalekohledu a jeho okolí. U největších dalekohledů je nutno přistoupit k chlazení primárního zrcadla, případně k jeho laminárnímu ofukování vzduchem.

3. POSTFOKÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

Zařízení umístěná za posledním, „vědeckým“ ohniskem dalekohledu, slouží k analýze zachyceného záření. Pomocí spektroskopických a spektropolarimetrových metod lze získat informace o fyzikálních podmínkách v různých vrstvách sluneční atmosféry, například o teplotě, tlaku, hustotě, magnetických a rychlostních polích.

Velké pozemní dalekohledy s průměrem objektivu nad 50 cm jsou v současné době vybaveny *adaptivní optikou*, která v reálném čase do značné míry kompenzuje chvění, deformaci a rozostření obrazu způsobené turbulencí v atmosféře. Adaptivní optika měří pomocí zvláštního čidla deformace přicházejících vlnoploch, které opravuje řízenými průhyby pružného zrcátka. Odražené vlnoplochy jsou téměř rovinné a vytvářejí kvalitní obraz, ovšem jen v malé části zorného pole, která je sledována čidlem. V současné době se vyvíjejí vícenásobné systémy adaptivní optiky, které budou moci korigovat téměř celé zorné pole.

Nejčastěji používanými postfokálními zařízeními jsou spektrografy a úzkopásmové laditelné filtry. Obvykle se kombinují s polarimetry pro měření magnetického pole z polarizace světla ve spektrálních čarách.

Klasický spektrograf rozkládá světlo, procházející vstupní štěrbinou, ve spektrum pomocí difrakční mřížky nebo hranolu. Vytvořený obraz spektra má dva rozměry. Jeden prostorový, ve směru podél štěrbinu, a druhý spektrální, rozvinutý podle vlnové délky ve směru kolmém ke štěrbině. K získání dvourozměrné prostorové informace se pořizují série spekter při současném pohybu obrazu Slunce po štěrbině (tzv. skenování). Spektrografy poskytují data s vysokým spektrálním, středním prostorovým a nízkým časovým rozlišením.

Úzkopásmový laditelný filtr snímá dvourozměrné obrazy oblastí Slunce ve velmi úzkém rozsahu vlnových délek (typicky 2–5 pm) a umožňuje vzorkovat různé části profilů spektrálních čar. Technicky je proveden jako dvojlomný filtr Lyotova nebo Šolcova typu nebo jako dva až tři Fabry-Pérotovy interferometry seřazené za sebou. Používají se také kombinace dvojlomných filtrů a interferometrů. K získání úplné spektrální informace se pořizují série obrazů postupně v různých vlnových délkách tak, aby se pokryl celý profil čáry. Úzkopásmové filtry poskytují data s vysokým prostorovým, středně velkým spektrálním a středním časovým rozlišením.

4. VELKÉ SLUNEČNÍ DALEKOHLEDY

Velké optické sluneční dalekohledy můžeme rozdělit podle jejich uvedení do provozu do tří skupin. První jsou klasické dalekohledy 20. století – americký Dunn Solar Telescope (DST), německý Vakuum Turm Teleskop (VTT), francouzský T lescope H liographique pour l'Etude du Magn tisme et des Instabilit s Solaires (THEMIS), holandsk  Dutch Open Telescope (DOT) a  v dsk  Swedish Solar Telescope (SST).

Druhá skupina představuje novou generaci 21. století – Solar Optical Telescope (SOT) na japonsk  družici HINODE, americk  New Solar Telescope (NST),  insk  New Vacuum Solar Telescope (NVST) a německo-Španělsko- esk  GREGOR.

Třetí skupinou jsou dalekohledy ve výstavbě nebo projektovan  – americk  Daniel K. Inou  Solar Telescope (DKIST, d ive ATST), indick  National Large Solar Telescope (NLST), evropsk  European Solar Telescope (EST) a Solar UV-Vis-IR Telescope (SUVIT) na projektovan  japonsk  družici SOLAR-C.

Parametry výše uvedených p stroj  jsou shrnuty v Tabulce 1. A  na DOT, THEMIS a kosmick  p stroje jsou všechny vybaveny adaptivní optikou. V popisech následujících obrázků jednotlivých dalekohledů uv dime pou ivan  postfok lnn  zařizení, p padn  dal i podrobnosti.



Obr. 1. *Dunn Solar Telescope (DST) na Sacramento Peak Observatory je nejstar  dalekohled ur en  pro vysok  rozlišení. Nap ji  tyřn  spektrografy (ASP, DLSP, FIRS a SPINOR) a dva  zkop smov  laditeln  filtry (IBIS a UBF).*



Obr. 2. Vakuum-Turm-Teleskop (VTT) na Observatorio del Teide napájí velký vertikální spektrograf vybavený polarimetrem TIP, úzkopásmový laditelný filtr TESOS a kamery pro přímé zobrazování.



Obr. 5. Swedish Solar Telescope (SST) na Observatorio del Roque de los Muchachos je jediným refraktorem mezi velkými slunečními dalekohledy. Napájí spektrograf TRIPPEL a úzkopásmový laditelný filtr CRISP.



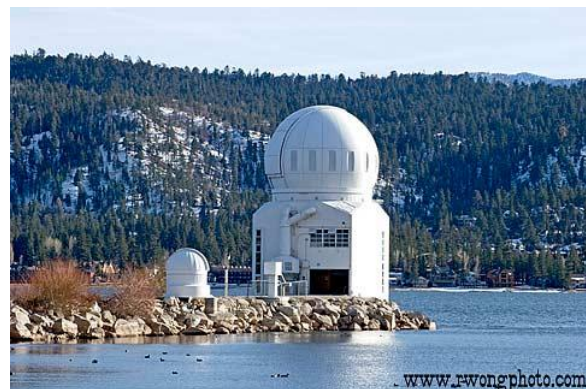
Obr. 3. THEMIS na Observatorio del Teide je vybaven vícekamerovým spektrografem pro přesnou spektropolarimetrii v několika spektrálních čarách současně. V současné době se pro něj vyvíjí adaptivní optika.



Obr. 6. Solar Optical Telescope (SOT) na družici HINODE je vybaven širokopásmovým a úzkopásmovým laditelným filtrem a spektrografem s polarimetrem.



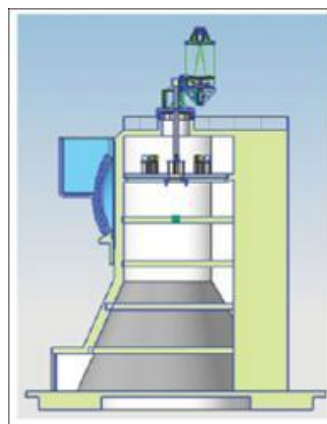
Obr. 4. Dutch Open Telescope (DOT) na Observatorio del Roque de los Muchachos byl prvním přístrojem, který prokázal výhody otevřeného tubusu. Slouží k přímému zobrazování sluneční fotosféry a chromosféry.



Obr. 7. New Solar Telescope (NST) na Big Bear Observatory napájí spektrografy FISS a CYRA a úzkopásmové laditelné filtry VIS, IRIM a NIRIS pro polarimetrii ve viditelném a IR oboru.



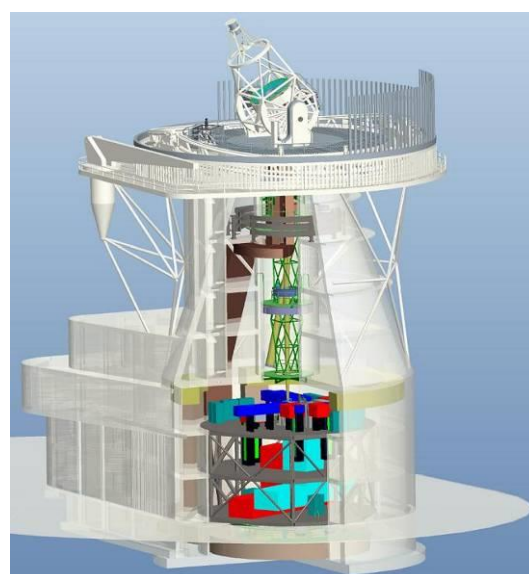
Obr. 8. *New Vacuum Solar Telescope (NVST) na Yunnan Observatory slouží k přímému zobrazování a spektroskopii v blízké IR oblasti.*



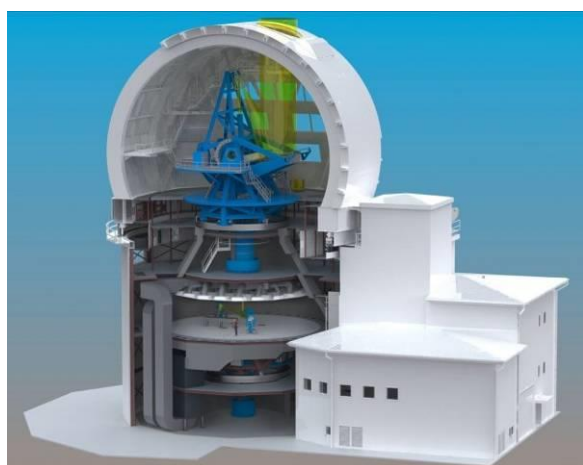
Obr. 11. *National Large Solar Telescope, umístěný vysoko v Himalájích, je indický projekt přístroje určeného pro spektropolarimetrická měření.*



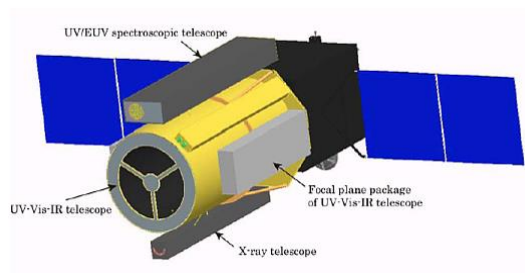
Obr. 9. *GREGOR na Observatorio del Teide je vybaven spektrografem GRIS pro IR oblast a úzkopásmovým laditelným filtrem GFPI pro viditelný obor.*



Obr. 12. *European Solar Telescope (EST) je celoevropským projektem. Dalekohled, který má stát na jedné z observatoří na Kanárských ostrovech, bude pozorovat zároveň v mnoha oblastech spektra.*



Obr. 10. *Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST), dříve Advanced Technology Solar Telescope (ATST) se staví na observatoři Haleakala na ostrově Maui (Havaj). Měl by se stát největším slunečním dalekohledem na světě.*



Obr. 13. *SUVIT je optický dalekohled projektovaný pro družici SOLAR-C. Bude vybaven úzkopásmovým laditelným filtrem a spektrografem pro měření magnetických polí ve sluneční chromosféře.*

Tabulka 1. Základní parametry velkých optických slunečních dalekohledů

Název	Umístění	Apertura	Optický systém	Tube	Dokončen	Odkaz
DST	Sac. Peak, NM	0,76 m	reflektor, mimo osu	vakuum	1969	[1]
VTT	Tenerife, E	0,70 m	reflektor, mimo osu	vakuum	1989	[2]
THEMIS	Tenerife, E	0,90 m	reflektor, v ose	helium	1996	[3]
DOT	La Palma, E	0,45 m	reflektor, v ose	otevřený	1997	[4]
SST	La Palma, E	1,00 m	refraktor, v ose	vakuum	2002	[5]
Hinode / SOT	kosmos	0,50 m	reflektor, v ose	--	2006	[6]
NST	Big Bear, CA	1,60 m	reflektor, mimo osu	otevřený	2010	[7]
NVST	Yunnan, Čína	1,00 m	reflektor, v ose	vakuum	2011	[8]
GREGOR	Tenerife, E	1,50 m	reflektor, v ose	otevřený	2012	[9]
DKIST (ATST)	Haleakala, HI	4,20 m	reflektor, mimo osu	otevřený	2019?	[10]
NLST	Merak, Indie	2,00 m	reflektor, v ose	otevřený	projekt	[11]
EST	Kanárské ostrovy	4,00 m	reflektor, v ose	otevřený	projekt	[12]
SOLAR-C / SUVIT	kosmos	1,50 m	reflektor, v ose	--	projekt	[13]

Poděkování

Práce vznikla za podpory Grantové agentury ČR (grant 14-04338S) a projektu AV ČR RVO: 67985815.

ODKAZY

- [1] <http://nsosp.nso.edu/dst>
- [2] <http://www.kis.uni-freiburg.de/?id=575&L=1>
- [3] <http://www.iac.es/eno.php?op1=3&op2=6&id=2&lang=en>
- [4] <http://www.staff.science.uu.nl/~rutte101/dot/>
- [5] http://www.isf.astro.su.se/NatureNov2002/telescope_eng.html
- [6] http://hinode.nao.ac.jp/sot_e/
- [7] http://www.bbso.njit.edu/nst_project.html
- [8] <http://fso.ynao.ac.cn/Introduction.aspx>
- [9] <http://www.kis.uni-freiburg.de/index.php?id=163&L=1>
- [10] <http://atst.nso.edu/>
- [11] <http://www.iap.res.in/nlst/>
- [12] <http://www.est-east.eu/>
- [13] http://hinode.nao.ac.jp/SOLAR-C/archive_e.html