

Modernizace 2m Perkova dalekohledu v Ondřejově

Miroslav Šlechta

*Největším optickým astronomickým přístrojem v České republice je dalekohled s průměrem hlavního zrcadla 2 m, umístěný v Ondřejově. V provozu je od srpna 1967, v roce 2012 byl nazván Perkovým dalekohledem podle docenta Luboše Perka (*26. 7. 1919, †17. 9. 2020), který byl duchovním otcem tohoto přístroje a po celou dobu, od začátku projektu v roce 1956 až do uvedení do provozu, byl zodpovědný za vědeckou stránku celého projektu (o ekonomickou část se staral tehdejší ekonomický náměstek Astronomického ústavu ing. Vladimír Rajský (*13. 1. 1926, †16. 1. 2000). Dalekohled postavila firma Carl Zeiss Jena, hlavním inženýrem byl Alfred Jensch (*19. 6. 1912, †6. 10. 2000).*

Ondřejovský dalekohled není jediným přístrojem tohoto typu, který vyšel z dílen firmy Zeiss. V průběhu let postavila firma několik podobných přístrojů pro země bývalého socialistického tábora: kromě Tautenburgu (1960) a Ondřejova (1967) ještě pro observatoř Šemacha (1966) v tehdejší Sovětské svazu (v Ázerbajdžánské SSR), Rožen v Bulharsku (1981) a Terskol v Rusku na severním Kavkaze (1996). Jednotlivé přístroje se od sebe více či méně liší podle pozorovacích programů, pro něž byly projektovány. Tautenburský přístroj je nejvíc svébytný. Je postaven na vidlicové paralaktické montáži a je to dosud největší Schmidtova kamera na světě. Korekční deska má průměr 134 cm, zrcadlo sférického tvaru má průměr 2 m. Dalekohled je však možné používat i v ohnisku Coudé, kde má světelnost 1:46. Přístroj v Ázerbajdžánu je prakticky totožný s ondřejovským. Má parabolické primární zrcadlo, lze jej využívat v primárním, Cassegrainově i Coudé ohniscích. Rovněž základní optické parametry jsou velmi podobné (světelnost v primárním ohnisku 1:4,5 je stejná pro oba přístroje, v Coudé je světelnost ondřejovského dalekohledu 1:32 a ázerbajdžánského 1:36). Stejný je dokonce i barevný design. Dalekohled na Roženu v Bulharsku je mechanicky rovněž totožný s ondřejovským (samozřejmě, každý přístroj je postaven pro příslušnou zeměpisnou šířku), avšak opticky je odlišný. Je postaven jako systém Ritchey–Chrétien, v primárním ohnisku má světelnost 1:8, v Coudé pak 1:36. S výjimkou dalekohledu observatoře v Tautenburgu, který je na vidlicové montáži, mají ostatní přístroje speciální tzv. podpůrnou montáž. Ta je vynálezem Alfréda Jenscheho. Fakticky se jedná o „zalomenou“ německou montáž. Výhoda je v tom, že s ohledem na pozici těžiště je málo namáhaná hodinová osa, což snižuje mechanické deformace a zvyšuje přesnost navádění dalekohledu. Rovněž prostorově je tento systém menší než německá montáž.

Po optické stránce byl ondřejovský reflektor projektován jako poměrně univerzální přístroj. Byl vybaven ve všech třech ohniscích, primárním, Cassegrainově i Coudé. První dvě ohniska byla vybavena jak kamerami pro přímou fotografii, tak spektrografy. Coudé ohnisko dostalo jenom spektrograf. V primárním ohnisku se přímé fotografie pořizovaly na skleněné desky o rozměrech 59×59 mm. Primární spektrograf používal desky 11×50 mm. Byl vybaven třemi různými kamerami, které umožňovaly dosáhnout rozlišení 33 až 400 Å/mm. Kamera pro přímou fotografii v Cassegrainově ohnisku používala

stejně desky 59×59 mm. Spektrograf používal desky 12,5×60 nebo 19,5×126 mm. Byl vybaven dvěma kamerami a měl rozlišení 10 až 75 Å/mm. V Coudé ohnisku byl umístěn spektrograf vybavený třemi kamerami, s nimiž dosáhl rozlišení 4,3 až 34,4 Å/mm. Pracovalo se s deskami 9×120 mm, 13,3×226 mm a 18,5×385 mm. Toto uspořádání umožnilo spektroskopicky sledovat různě jasné objekty s různým rozlišením (nejslabší objekty s nejmenším rozlišením v primárním ohnisku, naopak jasnější objekty s nejvyšším rozlišením v Coudé).

Vědecký výzkum

Výzkum ve stelárním oddělení měl původně dost široký záběr a v průběhu let doznával postupný vývoj a jisté zúžení. L. Perek a L. Kohoutek se svými spolupracovníky se zabývali zejména o planetární mlhoviny, jejich klasifikaci, vznik a vývoj. Avšak Dr. Perek se záhy stal ředitelem Astronomického ústavu (1968–1975) a potom odešel do OSN, kde se stal ředitelem Úřadu OSN pro vesmírné zále-

RNDr. Miroslav Šlechta, Ph.D. (*1971) vystudoval astronomii a astrofyziku na MFF UK. Ve stelárním oddělení Astronomického ústavu AV ČR v Ondřejově se zabývá zpracováním spektrálních dat a je vedoucím technické skupiny 2metrového dalekohledu.

žitosti. Dr. Kohoutek emigroval do Německa (1970), a tak tento program postupně zanikl. Další astronomové se věnovali dynamice pohybu hvězd – jak ve dvojhvězdách a násobných systémech, tak v galaxiích. Jiný tým se zaměřil na výzkum horkých hvězd s emisí. Byl to právě tento výzkum, který se postupně stal klíčovým projektem ve stelárním oddělení. V podstatě šlo o hypotézu, že většina horkých hvězd s emisí (Be hvězd) je členem těsného binárního systému. Přetok hmoty z jedné složky na druhou vytváří obálku horkých plynů (či akreční disk), v němž vznikají pozorované emisní čáry. Ve spektrech většiny horkých hvězd s emisí by tedy měly existovat nějaké periody, které lze interpretovat jako periody oběhu obou složek kolem společného těžiště. Hledání takových period a interpretace spekter se stalo základem pozorovacích programů 2m dalekohledu. Ovšem nemohlo zůstat jen u samotného pořizování a proměřování spekter. Teoretické modelování hvězdných atmosfér a hvězdných větrů bylo takřka od počátku součástí tohoto výzkumu.

K novějším směrům výzkumu patří studium masivních hvězd v různých stádiích vývoje, nové, extrémní hvězdy (např. *V838 Mon*), horké hvězdy se zakázanými čarami ve spektru, tzv. B[e] hvězdy, podtrpaslíci a bílí trpaslíci a i jedna supernova (*SN 2004dj*).

Nemá cenu rozepisovat se o mezinárodní spolupráci, která se rozvíjí zejména po roce 1989, bylo by to nad možností tohoto článku. Zmírně však stručně spolupráci s vědeckými a vzdělávacími institucemi z naší země, respektive též ze Slovenska – zejména to byl Astronomický ústav Slovenské akademie věd (chemicky pekuliární hvězdy a dvojhvězdy), Astronomický ústav MFF UK (dvojhvězdy) a PŘF MU.

S prudkým rozvojem výpočetní techniky v posledních letech se rozvinula na stelárním oddělení i další teoretická disciplína, astroinformatika, která se zajímá zejména o automatizaci práce s velkými objemy dat, vzájemné srovnávání a vyhledávání v datech, přičemž data nemusí být „dokonalá“. Ať už se jedná o identifikaci objektů na fotometrických snímcích, srovnávání fotometrických a spektroskopických dat, identifikace tvarů na spektrech (absorpce versus emise, různé tvary emisí), vady na snímcích, chyby při redukci dat apod. V posledních dvou desetiletích je do stelárního oddělení zařazena i skupina Astrofyziky vysokých energií, jejíž hlavní zaměření je sledování a interpretace vzplanutí gama záblesků – jsou to náhlá krátkodobá vysokenergetická vzplanutí v krátkovlnných oblastech spektra (rentgenové a gama záření). Tým mj. dohledává optické protějšky k těmto vzplanutím.

K tomuto typu výzkumu se 2m Perkův dalekohled nehodí, tým proto využívá vlastní menší přístroje, například 50cm reflektor.

Od roku 2015 byl zaveden zcela nový vědecký program studia exoplanet, resp. potvrzování (či vyvracení) možných kandidátů na exoplanety, s akcentem na tzv. horké Jupitery – hmotné planety, které obíhají blízko mateřských hvězd. Tým využívá ešeletový spektrograf umístěný (spolu s původním jednořádkovým spektrografem) v ohnisku Coudé.

Modernizace v minulosti

V uplynulých desetiletích došlo k několika modernizacím ondřejovského přístroje. Lze říci, že většinu z nich si vynutil technický pokrok. Jednak to byla postupná modernizace řídicí elektroniky. Je nutné připomenout, že projekt dalekohledu vznikl na přelomu 50. a 60. let a tehdejší době odpovídalo i zvolené technické řešení. Od původních selsynů se v 80. letech přešlo k řídicí elektronice maďarské firmy VILATI (firma Zeiss nedodávala vlastní elektronické řídicí systémy). V letech 1996–1998 se instaloval nový systém od firmy Science Systems, běžící pod operačním systémem QNX, a v letech 2006 a 2009 řídicí elektronika od firmy ProjectSoft HK, kterou používáme dosud (roku 2006 řízení dalekohledu, v roce 2009 spektrografů). Tento systém je postavený stavebnicově na elektronice firmy Siemens, komponenty jsou určeny pro průmyslový provoz, tj. jsou robustní a spolehlivé. Navíc firma Siemens garantuje dlouhodobou kompatibilitu s novými komponentami přicházejícími na trh.

Další oblastí postupné modernizace byla záznamová média. Původně, před vznikem elek-

tronických detektorů, se používaly skleněné fotografické desky – nikoli filmy, protože pro přesné proměřování je nezbytná tuhost a pevnost, které filmy postrádají. Od roku 1992 byl instalován první elektronický detektor, Reticon, zapůjčený natrvalo z Lickovy observatoře. Od roku 1997 se používají moderní CCD čipy, nyní již máme několikátou generaci, přičemž detektory chladíme kapalným dusíkem.

Velkou změnou bylo vybudování moderního ešeletového spektrografu. Uveden do provozu byl v roce 2004. Ešeletový spektrograf umožňuje zobrazit velký rozsah vlnových délek s velkým rozlišením. Přístroj vytvoří velké množství krátkých spekter s velkým rozlišením. Každé zobrazí odlišný rozsah vlnových délek. Tato krátká spektra lze pak „poskládat dohromady“ a získat jedno spektrum s velkým rozlišením a velkým rozsahem vlnových délek, v Ondřejově od blízke ultrafialové k blízké infračervené oblasti. Ešeletové spektrografy se vhodně používají k přesným měřením radiálních rychlostí, případně k detailnímu studiu úzkých spektrálních čar. Naopak se nehodí ke studiu širokých spektrálních čar (typickým příkladem mohou být H a He čáry horkých hvězd, spektra bílých trpaslíků, nov, supernov a podobně). Důvod je v tom, že krátký spektrální řád nezobrazí kontinuum kolem čáry – nelze tak dostatečně spolehlivě určit například ekvivalentní šířku čáry, což je důležitý údaj pro zjištění fyzikálních vlastností objektu.

Modernizace 2018–2019

O další modernizaci jsme uvažovali už řadu let. Rozhodovali jsme se mezi několika variantami. Co vlastně modernizovat či upravovat – a od



Doc. Luboš Perko před pilířem dalekohledu

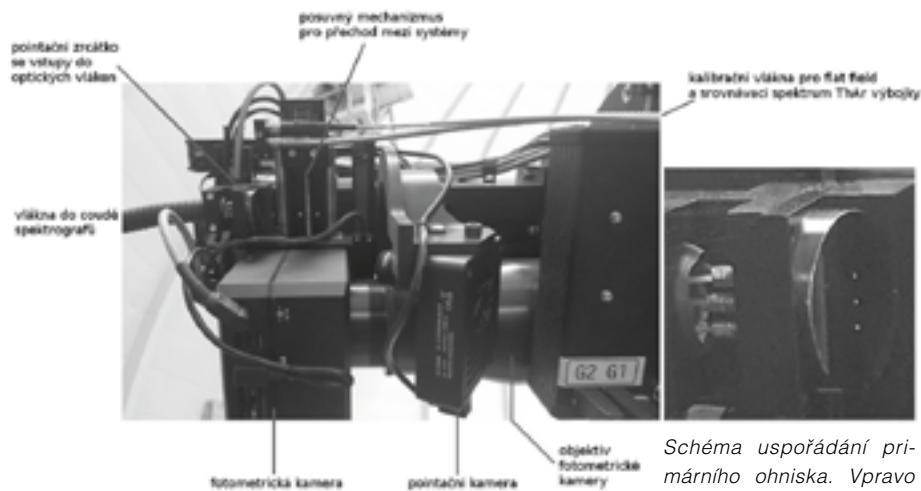


Schéma uspořádání primárního ohniska. Vpravo v detailu je zobrazeno šikmé rovinné zrcátko se vstupy pro vlákna.

toho se ovšem pak odvíjela otázka, jak modernizovat. Uvažovali jsme více variant, jednou z nich byla též úprava ešeletového spektrografu. Ten nyní dosahuje přesnosti radiálních rychlostí kolem 50 m/s, což umožňuje studium tzv. horkých Jupiterů. Rádi bychom ale zvýšili přesnost k hranici 10 m/s.

Nakonec jsme se však rozhodli modernizovat optický systém dalekohledu, neboť to slibovalo přinést užitek oběma spektrografům, které, jak jsme již uvedli, jsou instalovány v Coudé ohnisku. Dosavadní optický systém, sestávající ze soustavy zrcadel, jsme se rozhodli nahradit optickými vlákny. V čem spočívá výhoda takového řešení? V původní konfiguraci bylo použito celkem 6 optických ploch (z toho 4 zrcadla a jedna skleněná deska) před dosažením Coudé ohniska. Každé zrcadlo představuje nenulové ztráty světla, jež s počtem optických ploch exponenciálně narůstá. Každé zrcadlo navíc zvolna slepne (vlivem oxidace) a celková světelná účinnost zvolna klesá. Při 80% účinnosti každé plochy je celková účinnost již pod hranici pouhých 30%. Tomu musí odpovídat i pozorovací program přístroje – expoziční doby se prodlužují, řada objektů se časem stane zcela nedostupnou. S ohledem na 64m efektivní ohniskovou vzdálenost v Coudé ohnisku je pro techniky noční můrou (případně) nastavování zrcadel. Optická vlákna tento systém výrazně zjednoduší, o justáži nemluvě. Navíc, ze všech optických ploch pouze odrazná plocha primárního zrcadla bude s časem degradovat. Proto jsme od zvoleného řešení očekávali vyšší a hlavně mnohem vyrovnanější účinnost na dlouhé časové škále.

Než jsme se definitivně rozhodli tento plán realizovat, uvažovali jsme o něm více než čtyři roky. Není divu, je to největší zásah do systému dalekohledu od jeho uvedení do provozu v roce 1967. Všechny předchozí zásahy znamenaly rozšíření technického vybavení dalekohledu

a jeho observačních možností, nejednalo se však o zásahy do optického systému samotného dalekohledu. Svým způsobem lze říci, že z optického hlediska se fakticky jedná o jiný dalekohled. Celý projekt jsme konzultovali se zahraničními odborníky, kteří mají zkušenosti se stavbou vláknových spektrografů, třebaže v našem případě nešlo o stavbu nového spektrografu, ale o nový způsob napájení již hotových přístrojů. Diskutovali jsme například s kolegy z ESO v Garchingu, v Laboratorio Nacional de Astrofísica v Brazílii či v Pontificia Universidad Católica de Chile. Odborníci nás upozornili na řadu rizik i vhodných řešení. Například nám doporučili osmiúhelníková optická vlákna firmy CeramOptec. Tato vlákna totiž na výstupu poskytují velmi rovnoměrné osvětlení. V průběhu diskusí se objevila zajímavá myšlenka využít poměrně široké zorné pole v primárním ohnisku a instalovat též fotometrickou kameru pro přímé zobrazení zorného pole. To dosahuje přibližně $11 \times 11'$ (dnešní hodnota $7 \times 5'$ je daná velikostí použitého CCD čipu).

Realizaci projektu zajistila firma TopTec Turnov, která je součástí Ústavu fyziky plazmatu AV ČR. Projekt byl rozvržen na roky 2018–2019. To však neznamená, že dalekohled byl dva roky mimo provoz. Většinu času zabraly projekční a konstrukční práce a justáž optických prvků v Turnově. Dalekohled byl odstaven až v srpnu 2019. Všechny optické prvky (vyjma primárního zrcadla) jsme vyjmuli, odstranili jsme i dva „pavouky“, které držely dvě sekundární zrcadla uvnitř tubusu a instalovali jsme nový „pavouk“ do primárního ohniska. Pak jsme dalekohled zhruba vyvážili (celkový rozdíl hmotností byl více než půl tuny) a teprve potom jsme mohli instalovat nový systém a natáhnout vlákna do Coudé ohniska. Až ve finále jsme da-

lekohled přesně vyvážili, pomocí měření zatížení elektromotorů v hodinové a deklinační ose při pohybu dalekohledu. Vyvážení se nám povedlo tak přesně, že jsme byli schopni zpětně spočítat hmotnost turnovského zařízení v primárním ohnisku s přesností na 1,5 kg (přitom všechny pohyblivé části dalekohledu váží 83 tun!).

Modernizace byla dokončena v prosinci 2019, od ledna byl v provozu ešeletový spektrograf, od března jednořádkový spektrograf a rovněž od jara i fotometrická kamera. Ta byla provizorně vybavena klasickými UBVR filtry, nyní má u' , g' , r' , i' a z' filtry, jež lépe odpovídají moderním přehlídkám oblohy a odpovídá „jejich“ fotometrickému systému. Slavnostní předání dalekohledu do provozu se uskutečnilo až 26. června 2020, zpoždění bylo dáno protiepidemickými opatřeními. Tiskové konference se zúčastnila předsedkyně AV prof. Zařimalová a též doyen české astronomie, 101letý docent Perek.

Popis technického řešení

Optické zařízení musí být pro kvalitní zobrazení umístěno v optické ose primárního zrcadla. Proto jsou jak vstupy do optických vláken, tak i fotometrická kamera umístěny na pohyblivém jezdcí, který umožní nastavit do optické osy právě ten element, který astronom požaduje.

Nový systém je vybaven třemi optickými vlákny, každé má průměr aktivního jádra (které přenáší světlo) 100 μm , což v primárním ohnisku odpovídá hodnotě 2,3 úhlové vteřiny. To je typický průměrný seeing u Perkova dalekohledu. Do ešeletu je vedeno jedno vlákno, do jednořádkového spektrografu dvě. Jednořádkový spektrograf totiž umožňuje svou konstrukci



Obrázek z pointační kamery. Na prostředním vlákně (do jednořádkového spektrografu) je nastavena hvězda 12 Vul. Pointační kamera nemusí poskytovat dokonalý obraz. Stačí, aby bylo vždy možné nastavit hvězdu do příslušného vlákna. Proto se na pointaci nepoužívá ani chlazená kamera ani žádné fotometrické filtry. Pointační kamera má limitní magnitudu zhruba 17,5, zatímco spektroskopie je přibližně možná pro hvězdy do magnitudy 14,2.

odečítat rozptýlené světlo pozadí oblohy. Jedno vlákno tedy slouží k pořízení spektra hvězdy, druhé vlákno k pořízení rozptýleného světla oblohy. Obě spektra se pak od sebe při zpracování mohou odečíst. Ešelet to neumožňuje a stačí tedy jen jedno vlákno.

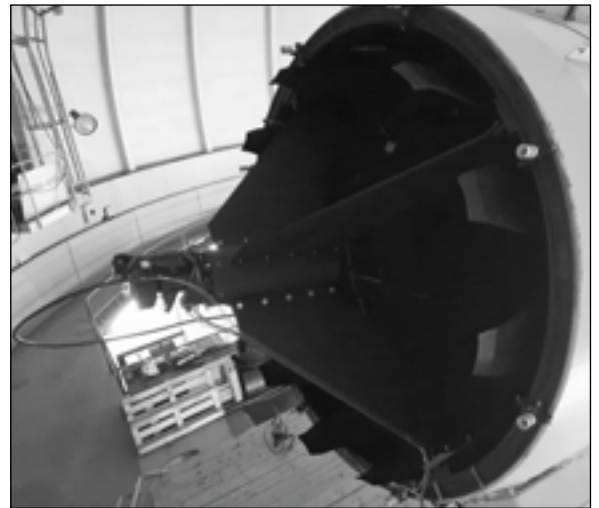
Všechna tři optická vlákna jsou uložena v rovinném zrcátku, které je skloněno vůči optické ose. Na takto skloněné rovinné zrcátko je zaostřena kamera, která slouží k pointaci dalekohledu. Mimo toto zrcátko je umístěna již zmiňovaná fotometrická kamera. K pointaci slouží samotné pořizované snímky. Celkově to znamená, že do optické osy lze nastavit čtyři elementy – kameru a tři vlákna. Přejezd mezi nimi netrvá déle než jednu minutu, takže během noci lze střídát jakékoliv konfigurace podle potřeby a požadavku astronomů. Ty čtyři zmíněné polohy však nejsou všechny možné pozice „jezdce“ v primárním ohnisku. Je třeba též zajistit exponování kalibračních spekter. V případě fotometrické kamery je situace snadná – exponuje se stejnorodé pole (flat field), temný proud a zero snímky. Nic z toho nevyžaduje jakékoliv dodatečné zařízení. Jiná situace je v případě spektroskopie. Využíváme velmi kvalitní CCD čipy a nemusíme exponovat temný proud. Avšak musíme exponovat kalibrační spektra a stejnorodá pole, která ve spektroskopii slouží k eliminování odlišné účinnosti jednotlivých pixelů, ale též k odstranění vlivu antireflexních vrstev na CCD čipu. Exponuje se spektrum běžné žárovky s wolframovým vláknem, ale bez ochranné vrstvy proti UV záření. Kalibrační spektrum Th–Ar výbojky slouží ke kalibraci škály vlnových délek. Z důvodu úspory místa v primárním ohnisku řešíme tato kalibrační spektra dalšími dvěma vlákny, která přivádějí „kalibrační světlo“ ke vstupu do „vědeckých“ vláken. Fakticky tak pořizujeme kalibrační snímky způsobem „z vlákna do vlákna“.

Co se týká vláken, ta jsou vedena tubusem, deklinační a potom hodinovou osou dalekohledu do Coudé místnosti v přízemí budovy kopule. Tam se pak dělí, jedno vlákno jde do ešeletu, dvě do jednořádkového spektrografu. Z fyzikálních důvodů bylo nutno přidat ještě další prvky mezi vlákna a vstupní šterbinu spektrografu (od šterbiny dál zůstaly oba spektrografy nedotčené, modernizace jen zajistila jiný způsob přenosu světla ke šterbinám). Důvod je v tom, že v primárním ohnisku je světelnost 1:4,5, ve vláknech dochází k mírné degradaci na hodnotu 1:4, zatímco spektrografy jsou postaveny na světelnost Coudé ohniska 1:32. Je tedy nutné změnit světelnost z 1:4 na 1:32. To vede k tomu, že světelný svazek se rozšíří 8x (poměr

32:4). Má-li vlákno průměr aktivního jádra 100 μm , je nový světelný svazek široký 800 μm . V ešeletu není žádný technický problém, je stavěn na šterbinu širokou 600 μm , a protože světelný svazek má gaussovský profil, jsou ztráty zcela zanedbatelné. Proto je zde využita jenom dvojice optických systémů, jeden ze svazku z vlákna (rozbíhavost 1:4) vytvoří rovnoběžný paprsek, druhý element tento paprsek „zařadí“ na šterbinu, a to s požadovanou světelností 1:32. Toto však nelze použít v jednořádkovém spektrografu, neboť ten je stavěn na šterbinu 200 μm . Při světelném svazku 800 μm by ztráty dosahovaly mnoha desítek procent a fakticky by znehodnotily celý spektrograf. Proto jsme instalovali zcela nový systém, který je pro tento účel světovým unikátem – tzv. „free form zrcadlo“. Je to složitá optická plocha sledující polynom vysokého stupně, která jednak změní světelnost na tu požadovanou hodnotu 1:32, ale též změní tvar světelného svazku z kruhového na obdélníkový. Fakticky tak vlastně imituje šterbinu. Skutečná šterbina je tam použita proto, že příčný profil je gaussovský a kovová šterbina „ořízne“ křídla tohoto gaussovského profilu. Pokud je nám známo, toto řešení nebylo dosud použito na žádné světové observatoři.

A co budoucnost?

Pochopitelně nechceme usnout na vavřínech. I v budoucnosti se chystáme na zdokonalování našeho dalekohledu a jeho vybavení. Jednak zvažujeme to, o čem jsme již přemýšleli – zvýšení přesnosti ešeletového spektrografu. Je to velice dobrý přístroj poskytující kvalitní vědecká



Primární ohnisko vybavené novým optickým systémem

data a zasluhuje si další rozvoj. Jednou z možností, jak zvýšit přesnost ondřejovského ešeletu, je lepší tepelná stabilizace. V současné době je přístroj stabilizován s přesností přibližně 0,4 °C. Věříme, že lepší teplotní podmínky zlepší jeho přesnost, byť asi nezůstane jenom u toho.

Další možností, jak modernizovat dvoumetr, je vybudování nízkodisperzního spektrografu – nejspíš přímo v primárním ohnisku. Tím bychom získali kompletní trojici spektrografů pro širokou škálu výzkumných programů: spektrograf nízkodisperzní, střednědisperzní (existující jednořádkový) a vysokodisperzní (existující ešelet). Je samozřejmé, že hlavní slovo k takovým úvahám musí mít astronomové, kteří přístroje budou využívat. Nemá jistě cenu budovat přístroj, o který nebudou mít astronomové zájem. Každopádně jsme přesvědčeni o tom, že Perkův dalekohled má ještě co nabídnout a stojí za to dále jej rozvíjet a poskytovat stále kvalitnější a komplexnější pozorování.

