

# Příběh dalekohledu GREGOR

M. Sobotka, *Astronomický ústav AV ČR, Ondřejov, michal.sobotka @asu.cas.cz*

## Abstrakt

Dne 21. května 2012 byl na Tenerife slavnostně uveden do provozu největší evropský sluneční dalekohled GREGOR. Poté nastalo téměř čtyřleté období doladování systémů a prvních ověřovacích pozorování. Do rutinního provozu přechází tento reflektor o průměru 1,5 metru až v letošním roce (2016). V příspěvku popisujeme optický systém dalekohledu s adaptivní optikou, mechanické řešení, postfokální přístroje a vývoj projektu od roku 2001 včetně potíží s hlavním zrcadlem. Na projektu se spolu se čtyřmi německými institucemi (KIS, AIP, AIG, MPS), španělským IAC a švýcarským IRSOL podílí i Astronomický ústav AV ČR.

## 1. ÚVOD

Španělská observatoř Teide (Izaña) na ostrově Tenerife, provozovaná Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), je od osmdesátých let minulého století základnou německých slunečních fyziků. V roce 1984 zde byl uveden do provozu *Gregory-Coudé Teleskop* (GCT), přestěhovaný z Orseliny u Locarna (Švýcarsko). Tento vakuový dalekohled o průměru 45 cm byl vybaven velkým optickým spektrografem a provozován tehdejší Univerzitní hvězdárnou v Göttingen (USG, nyní Astrofyzikální ústav Göttingen, IAG).

V roce 1997 navrhl ředitel Kiepenheuerova ústavu pro sluneční fyziku (KIS) Oskar von der Lüche řediteli USG Franzu Kneerovi, aby GCT byl nahrazen „něčím větším“, o průměru 1,5 metru, a jeho návrh byl nadšeně přijat. Ke spolupráci byl přizván i Jürgen Staude z Astrofyzikálního ústavu v Postupimi (AIP). Vzhledem k tomu, že nový dalekohled měl využívat stávající budovu GCT a že své úsilí spojily tři významné německé instituce, výstavba nového přístroje se mohla uskutečnit.

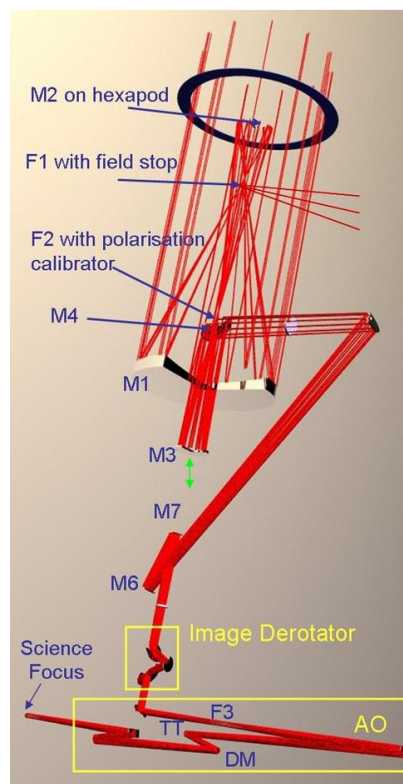
V roce 2001 byl schválen projekt GREGOR s náklady kolem 4 milionů Euro, financovaný zemskými vládami Bádenska-Würtenberska a Braniborska a z federální podpory příslušným univerzitám (Kneer 2012). Manažerem projektu se stal Reiner Volkmer, odborník se zkušenostmi jak z vědeckého výzkumu, tak i z průmyslu. Původním záměrem bylo uvést dalekohled GREGOR do provozu v roce 2004.

## 2. GREGOR

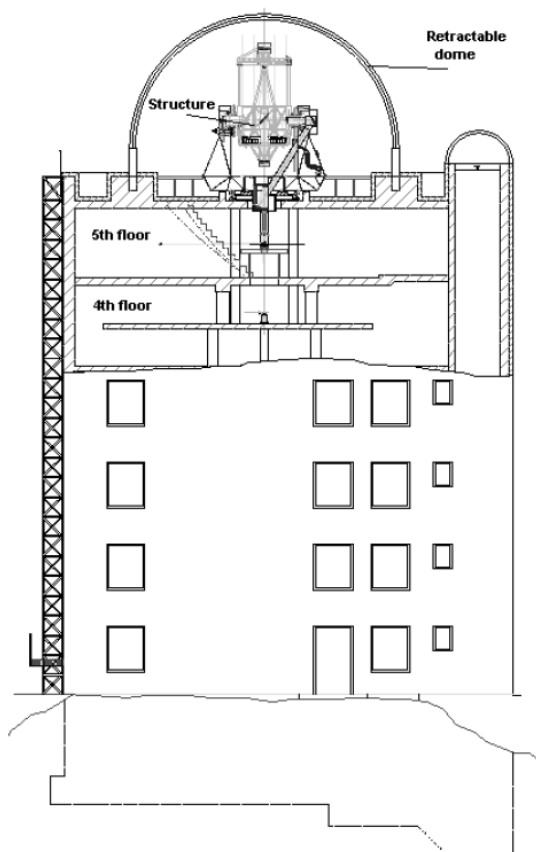
V současnosti největší evropský sluneční dalekohled GREGOR je navržen pro přesná měření magnetického pole (z polarizace spektrálních čar) a pohybů plynu ve fotosféře a chromosféře s rozlišením 70 km na Slunci. Mezi jeho hlavní vědecké úkoly patří studium interakce

mezi konvekcí a magnetickým polem ve fotosféře, pochopení původu jemných struktur ve slunečních skvrnách, nalezení role, kterou hraje sluneční magnetismus v cyklické aktivitě Slunce a odhalení mechanismů ohřevu sluneční chromosféry a koróny (Schmidt et al. 2012). Počítá se také s využitím dalekohledu pro noční pozorování.

*Optika dalekohledu* (Soltau et al. 2012) je navržena jako dvojitý Gregoryho systém se třemi aktivními zrcadly (obr. 1). Hlavní zrcadlo o průměru 1,5 m a ohniskové



Obr. 1. Optické schéma dalekohledu GREGOR.



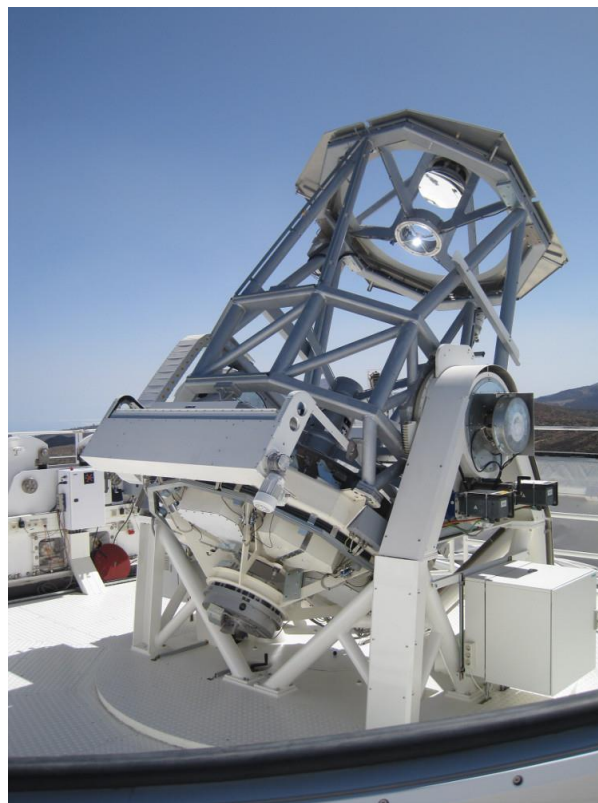
**Obr. 2. Umístění dalekohledu v budově.**

vzdálenosti 2,5 m (F/1,7) soustřeďuje světlo do primárního ohniska F1, kde je umístěna vodou chlazená clona se zrcadlovým povrchem. Ta odráží většinu světla se zářivým výkonem kolem 2 kW mimo dalekohled a vymezuje zorné pole 150".

Procházející světlo dopadá na sekundární zrcadlo M2 umístěné na hexapodové montáži, která umožňuje aktivně opravovat chyby v justáži dalekohledu. Zrcadlo M2 vytváří sekundární obraz v ohnisku F2, kde je umístěna kalibrační jednotka pro měření polarizace. Světlo prochází otvorem v zrcadle M4 a dopadá na zrcadlo M3, které vytváří výsledný obraz Slunce v ohnisku F3 o efektivní ohniskové vzdálenosti 55,6 m. Rovinná zrcadla M4 – M7 vedou světlo vakuovou coudé dráhou přes rotátor obrazu do F3, za nímž následuje systém adaptivní optiky.

Optika dalekohledu umožňuje dosáhnout zobrazení s difrakčním limitem 0,08" (60 km na Slunci) na vlnové délce 480 nm a pozorovat v optickém oboru od 350 nm do 2,5  $\mu\text{m}$ .

*Mechanická konstrukce* musela být co nejkompaktnější, aby se dalekohled vešel na vrchol budovy bývalého GCT (obr. 2). Proto byla zvolena alt-azimutální montáž, která má ovšem tu vlastnost, že se v průběhu dne obraz Slunce otáčí. Pro kompenzaci otáčení musí být do optické cesty



**Obr. 3. Pohyblivá část dalekohledu na vrcholu budovy.**

zařazen rotátor obrazu, který rovněž umožňuje natočit obraz podle potřeb pozorovacího programu. Rotátor je spolu s adaptivní optikou a některými postfokálními přístroji umístěn v optické laboratoři v pátém patře budovy, kam je světlo přiváděno coudé dráhou. O patro níž je uzavřený prostor s velkým spektrografem pro infračervený obor a ve třetím patře se nachází řídicí místnost.

Mechanická struktura dalekohledu (obr. 3) je velmi stabilní – absolutní přesnost navedení je 1" (Volkmer et al. 2012). Bílé stínící plechy zabráňují ohřívání struktury přímým slunečním světlem. Kromě clony v primárním ohnisku je chlazené i samotné primární zrcadlo. Chladí se vzduchem na 2° C pod teplotou okolí, aby v jeho blízkosti nevznikala tepelná turbulence vzduchu.

Příliš malá původní *kopule* GCT byla nahrazena skládací kopulí o průměru 9 m z velmi odolné dvojité textilní tkaniny (Hammerschlag et al. 2012). Plně složená ponechává dalekohled na střeše budovy v otevřeném prostoru, což umožňuje laminární proudění vzduchu mechanickou strukturou a při dostatečně silném větru zamezuje vytváření škodlivé tepelné turbulence. Zavřená kopule chrání dalekohled i proti velmi nepříznivým meteorologickým podmínkám (námraza, déšť, sníh, vítr až 250 km/h).

*Adaptivní optika* (obr. 4) v reálném čase do značné míry kompenzuje chvění, deformaci a rozostření obrazu, jež



**Obr. 4.** Optická laboratoř se systémem adaptivní optiky pod výstupem z dalekohledu (ještě bez rotátoru obrazu).

způsobuje turbulence v zemské atmosféře. Pomocí zvláštního čidla měří deformace přicházejících vlnoploch, které opravuje řízenými průhyby pružného zrcátka. Odražené vlnoplochy jsou téměř rovinné a vytvářejí kvalitní obraz v určité části zorného pole, která je sledována čidlem. Pro GREGOR je adaptivní optika nevyhnutelná, protože 1,5 m zrcadlo integruje příliš velké množství turbulentních vzduchových „bublin“, které deformují vlnoplochu. Bez adaptivní optiky by byl obraz značně rozostřený.

Současný systém (Berkefeld et al. 2012) má čidlo se 156 poli o velikosti 12", pracující na frekvenci 2500 snímků za sekundu. Celkový pohyb obrazu je korigován kmitajícím rovinným zrcátkem a deformace vlnoploch pružným zrcátkem s 256 piezoelektrickými aktuatory. Zároveň se vyvíjí vícenásobný systém adaptivní optiky, který bude moci korigovat téměř celé zorné pole.

### 3. ÚČAST ASTRONOMICKÉHO ÚSTAVU AV ČR

V Astronomickém ústavu (ASU) jsme se zajímali o projekt GREGOR od samého počátku. V roce 2001 jsme uzavřeli dohodu o spolupráci s AIP v Postupimi a na jejím základě získali grant českého Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy, díky němuž jsme mohli vstoupit do projektu jako partner AIP s příspěvkem 250 tisíc Euro.

Úkolem ASU byl návrh a vývoj rotátoru obrazu, který probíhal v letech 2002–2006. Použili jsme klasické provedení rotátoru se třemi rovinnými zrcadly (obr. 1) a vypracovali návrh dvou modelů s aperturami 80 a 140 mm. Dále jsme vyvinuli algoritmy kompenzace otáčení obrazu, systém řízení rotátoru a metodiku justáže zrcadel, která musí být nastavena s přesností lepší než jedna oblouková minuta. Rotátor s aperturou 140 mm byl pak vyroben v KIS ve Freiburgu a integrován do dalekohledu v roce 2015 (obr. 5).



**Obr. 5.** Rotátor obrazu pod výstupem z dalekohledu. Vpravo je vidět část optické lavice s adaptivní optikou.

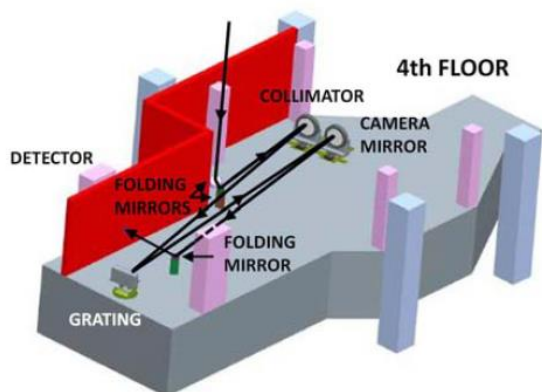
Po uvedení dalekohledu do zkušebního provozu jsme se od roku 2011 účastnili justáže, zkoušek a kalibrace dalekohledu a postfokálních přístrojů. Pomáhali jsme také při prvních testovacích pozorováních v období 2014–2015.

### 4. PRŮBĚH PROJEKTU

K původnímu konsorciu složenému z KIS, AIG a AIP+ASU se během projektu připojovaly další instituce. Hostitelský IAC si vzal na starost vývoj a stavbu velkého spektrografu pro infračervený obor, Ústav Maxe Plancka pro výzkum sluneční soustavy (MPS), sídlící v Katlengurg-Lindau a později v Göttingen, prakticky převzal úkoly AIG a nejnovějším členem konsorcia se stal švýcarský IRSOL z Locarna, který ve spojení s KIS vyvíjí a zkouší svůj spektropolarimetr ZIMPOL.

V roce 2002 byla zahájena stavba mechanické části dalekohledu, nové kopule a přestavba budovy. Tyto práce byly úspěšně dokončeny podle plánu v roce 2004. Výroba primárního zrcadla M1 byla zahájena rovněž v roce 2002, ale tady nastaly nepředvídané problémy. Původně mělo být zrcadlo vyrobeno z karbidu křemíku SiC (materiál *Cesic*), který výborně splňuje požadavky na nízkou váhu zrcadla a vysokou tepelnou vodivost, aby se zrcadlo dalo účinně chladit. Ze stejného materiálu měla být i zrcadla M2 a M3. Ačkoliv s výrobou menších zrcadel z SiC byly celkem dobré zkušenosti, primární zrcadlo o průměru 1,5 m se nepodařilo vyrobit do roku 2008 ani na čtvrtý pokus.

Proto se konsorcium rozhodlo, že M1 nechá udělat z klasického sklokeramického materiálu *Zerodur*, i když tím jeho váha vzroste z původních 165 kg na 215 kg. Poměrně malého přírůstku váhy bylo dosaženo díky speciální vylehčené konstrukci zrcadla, kde poměrně tenkou odraznou plochu podepírá lehká voštinová struktura. V důsledku toho bylo nutno překonstruovat a



Obr. 6. Schéma infračerveného spektrografu GRIS.

znovu vyrobit objímku zrcadla a chladicí systém. V roce 2010 bylo M1 úspěšně dokončeno a v roce 2011 byl dalekohled konečně hotov a mohlo se začít s justáží a prvními testy. Během následujících let se ukázalo, že ani zrcadla M2 a M3 z materiálu *Cesic* nejsou „to pravé“. Měla příliš vysoké rozptýlené světlo a byla postupně nahrazena novými zrcadly ze *Zeroduru*.

Oficiální „první světlo“ tak GREGOR spatřil až 12. května 2012 v přítomnosti nejen svých tvůrců a dalších slunečních fyziků, ale i zástupců financujících agentur, vlády a regionálních politiků. To však ještě neznamenalo, že všechno funguje jak má, a následovaly téměř dva roky testů, ladění a úprav, než mohla v roce 2014 začít první vědecká pozorování.

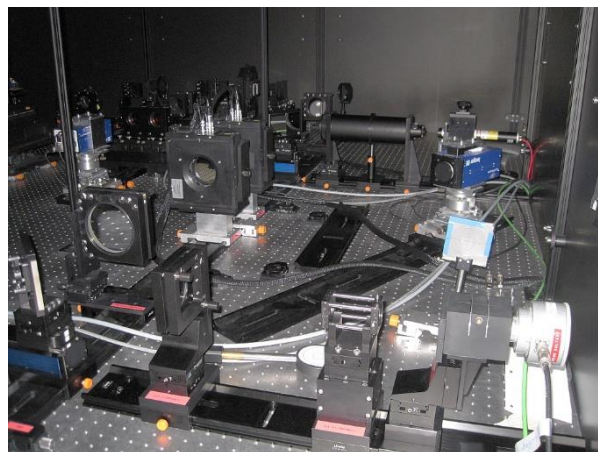
## 5. SOUČASNÝ STAV

V současnosti (2016) je GREGOR plně funkční, včetně systému adaptivní optiky a tří postfokálních přístrojů:

*Širokopásmové zobrazovací zařízení* (BBI, von der Lühe et al. 2012) pořizuje detailní snímky sluneční fotosféry s nejvyšším úhlovým rozlišením ( $0,08''$ ) v rozsahu vlnových délek 397–777 nm.

*Infračervený spektrograf* (GRIS, Collados et al. 2012) je velký šterbinový mřížkový spektrograf (obr. 6), vybavený skenovacím zařízením a polarimetrem, který slouží k pozorování Slunce v magneticky citlivých čarách hélia, křemíku a železa v rozsahu vlnových délek 1,0–2,3  $\mu\text{m}$ . Infračervená kamera GRIS snímá spektra s frekvencí 30 snímků za sekundu s úhlovým rozlišením  $0,13''/\text{pixel}$  a spektrálním rozlišením 1,8–6,4 pm/pixel.

*Fabry-Pérotův spektrometr* (GFPI, Puschmann et al. 2012) je úzkopásmový laditelný filtr, jehož základem jsou dva Fabry-Pérotovy etalony (obr. 7). Pracuje v rozsahu vlnových délek 580–660 nm s šířkou pásma propustnosti (FWHM) kolem 2 pm. Na rozdíl od klasického spektrografu pořizuje série 2D snímků Slunce, při nichž se v malých krocích mění vlnová délka. Z takových sérií lze rekonstruovat profil spektrální čáry v každém bodě zorného pole. Od roku



Obr. 7. Pohled na optický stůl spektrometru GFPI. V levé horní části obrázku jsou vidět Fabry-Pérotovy etalony.

2017 bude vybaven polarimetrem, který umožní měřit magnetická pole.

V letech 2014–2015 proběhla první vědecká pozorování s dalekohledem GREGOR, během nichž se využívaly všechny tři postfokální přístroje. Objektem byly sluneční skvrny a jejich jemná struktura včetně světelných mostů, magnetické pole skvrn ve fotosféře ale i chromosféře, rychlostní pole ve fotosféře aktivních oblastí, magnetické pole v klidné fotosféře, a také jevy v chromosféře a koróně jako erupce, mikroerupce a systémy koronálních smyček. Výsledkem této kampaně je desítky vědeckých prací, které vyjdou v roce 2016 v prestižním časopise *Astronomy & Astrophysics*.

## 6. ZÁVĚR

Dalekohled GREGOR je asi posledním slunečním přístrojem v Evropě, který byl postaven jako „národní“, i když Německu pomáhalo i Česko, Španělsko a Švýcarsko. Další velké přístroje, které by posunuly sluneční fyziku dál, budou vyžadovat daleko širší mezinárodní spolupráci. Projekt dalekohledu EST o průměru čtyř metrů musí počítat s účastí alespoň čtrnácti evropských zemí, aby se mohl uskutečnit.

## LITERATURA

- Berkefeld, T., Schmidt, D., Soltau, D., et al., AN, 333, 863  
 Collados, M., López, R., Páez, R., et al. 2012, AN, 333, 872  
 Hammerschlag, R.H., Kommers, J.N., Visser, S., et al., AN, 333, 830  
 Kneer, F. 2012, AN, 333, 790  
 Puschmann, K.G., Denker, C., Kneer, F., et al. 2012, AN, 333, 880  
 Schmidt, W., von der Lühe, O., Volkmer, R., et al. 2012, AN, 333, 796  
 Soltau, D., Volkmer, R., von der Lühe, O., Berkefeld, T. 2012, AN, 333, 847  
 Volkmer, R., Eisenträger, P., Emde, P., et al. 2012, AN, 333, 816  
 von der Lühe, O., Volkmer, R., Kentischer, T.J., Geissler, R. 2012, AN, 333, 894