

Díky českým vědcům uvidí ALMA naše Slunce pětkrát ostřeji

Jana Žďárská

Fyzikální ústav AV ČR, Na Slovance 2, 182 00 Praha 8; zdarskaj@fzu.cz

Observatoř ALMA se svými 66 velice přesnými interferometrickými anténami ve tvaru parabolických zrcadel umožňuje od roku 2017 pozorovat i Slunce. Ve srovnání s pozorováním „standardních“ objektů ve vesmíru bylo však rozlišení zachyceného obrazu při výzkumu Slunce dosud velmi omezené. Čeští vědci pod vedením Miroslava Bárty z Astronomického ústavu AV ČR navrhli cestu, jak toto omezení, úzce související s atmosférickou turbulencí v místě pozorování, obejít.

Observatoř ALMA¹ je společným projektem ESO (*The European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere*), americké NRAO (*National Radio Astronomical Observatory*) a japonské NAOJ (*National Astronomical Observatories of Japan*) a díky svému technickému vybavení představuje špičkový přístroj astrofyzikálního výzkumu umožňující vědcům zase více, lépe a s přesnějšími výsledky nahlížet do vesmíru a do procesů v něm probíhajících.

Jeden z uzlů Evropského regionálního centra ALMA se nachází také v České republice, která do projektu vstoupila v roce 2009. A právě čeští astronomové pod vedením Miroslava Bárty se v roce 2017 významně podíleli na vývoji speciálního pozorovacího režimu (*Solar ALMA Observing Mode*) pro pozorování Slunce. A nyní úspěšně vyřešili i další problém týkající se provozu observatoře ALMA, a to významné zvýšení rozlišení pozorovaného obrazu.

Provoz observatoře ALMA byl oficiálně zahájen v roce 2013 a pozorování Slunce bylo schváleno v roce

1 J. Žďárská: Čeští vědci na observatoři ALMA. *Čs. čas. fyz.* **69**, 458–461 (2019).



Obr. 1 Čeští astronomové pod vedením Miroslava Bárty se v roce 2017 významně podíleli na vývoji speciálního pozorovacího režimu (*Solar ALMA Observing Mode*) pro pozorování Slunce. Foto: Archiv Miroslava Bárty

2016. „*Sluneční projekty z celé Evropy se od té doby podporují a zpracovávají tady u nás v Ondřejově, protože my jsme na tuto činnost specialisté. Při pozorování Slunce v rámci slunečního režimu ale panují určitá omezení, o kterých se vědělo již při budování observatoře a za která sluneční astrofyzici nebyli příliš rádi. Nejvíce nás trápilo, že ALMA nemůže pozorovat Slunce s vysokým rozlišením. A začali jsme se pít po tom, proč to tak vlastně je...*“ vysvětluje Miroslav Bárta.

ALMA se rozkládá na plošině Chajnantor v severním Chile ve výšce 5040 m n. m. Observatoř tvoří 66 dvanáctimetrových (a sedmimetrových) antén ve tvaru parabolických zrcadel, která umožňují pozorování v oblasti mikrovln o délkách 0,3–9 mm. To, co dělá z observatoře ALMA výjimečné pozorovací zařízení s vysokou citlivostí, je především to, že je možno do soustavy zapojit všech 66 antén a jejich celková plocha se tak dostane na 6500 m². Díky tomu je ALMA v současné době absolutně největším přístrojem schopným pozorovat vesmír v milimetrových a především submilimetrových vlnových délkách.

Observatoř ALMA slouží zejména k pozorování galaxií a dalších vesmírných objektů, jako jsou protoplanetární disky, exoplanety či první galaxie ve velmi vzdáleném vesmíru. ALMA však také pozoruje objekty Sluneční soustavy – planety a jejich měsíce, komety a rovněž naše Slunce.

Pro nastavení pozorování je velkou výhodou, že se jednotlivé antény mohou po planině pohybovat. Převoz antén zajišťují dva speciální transportéry pojmenované Otto a Lore², které mohou antény rozličně přesouvat do různých uskupení. Antény tak mohou pracovat ve vzdálenostech od 160 m do 16 km, což umožňuje soustavě ALMA zaměřovat různé zdroje radiového záření ve vesmíru, podobně jako to dělá VLA v Novém Mexiku v USA.

Pohyblivých antén je zhruba 50 a míst, kam se tyto antény mohou přesouvat, je více než třikrát tolik. Různým rozmístěním antén se tak dají získat pozorova-

2 <https://www.youtube.com/watch?v=ZfQStqhh7J8>

cí uskupení od prostorového uspořádání C-1 po C-10. V každé z těchto variabilních konfigurací ALMA se trvá zhruba tři týdny až měsíc. Během dvou let tak antény vystřídají všechny konfigurace od C-1, která je nejvíce kompaktní (antény jsou od sebe na vzdálenost 160 m), až po C-10, kdy jsou nejvzdálenější antény dané konfigurace od sebe zhruba 16 km daleko. Čím jsou od sebe antény dál, tím je zároveň i větší rozlišení (populárně řečeno zvětšení) a na pořizovaných obrázcích jsou poté zachyceny podrobnější detaily.

A nyní se již pojďme podívat na to, co a jak ALMA pozoruje či pozorovat může. Je zajímavé, že pozorování galaxií se zdá být mnohem jednodušší, nežli tomu je při pozorování Slunce. „Je to především proto, že Slunce je veliký objekt, který zabírá celé zorné pole antény,“ vysvětluje Miroslav Bárta a dodává, „také je mnohem jasnější, má svou vlastní, poměrně rychlou dynamiku, a navíc se mezi hvězdami také pohybuje.“

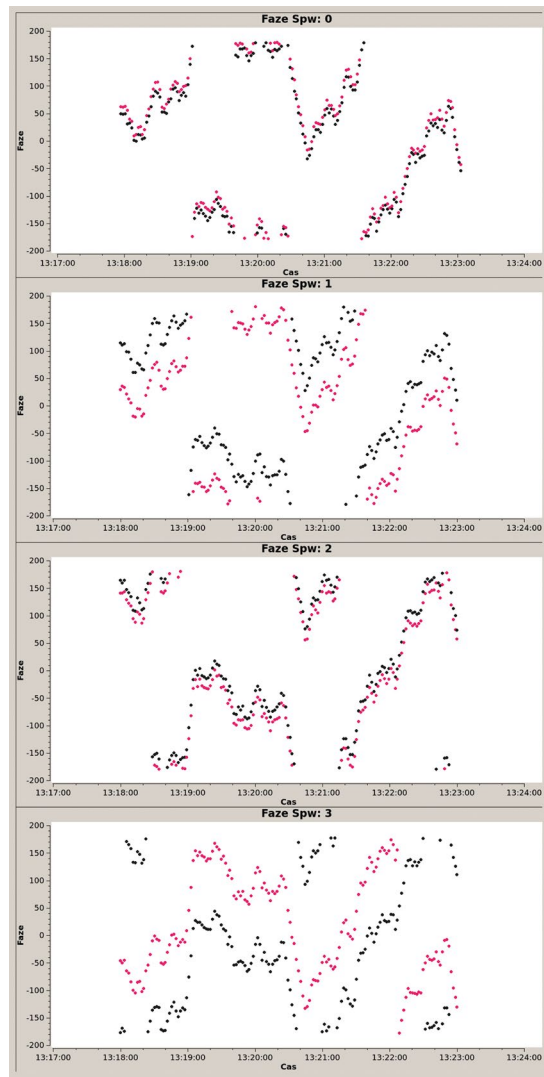
Když tedy astronomové pozorují hodně vzdálené objekty ve vesmíru, jejich obraz zabírá jen malou část ve středu zorného pole. Pro tato pozorování mohou pohodlně využít rozlehlé konfigurace antén, např. C-10 s délkou základny 16 km, a dosáhnout tak perfektního rozlišení. Vzdálené objekty jsou zároveň i hodně slabé a na úrovni prostorových škál, které je možno rozlišit, jsou statické. Signál od nich přicházející se proto může střídat i několik nocí. Naproti tomu sluneční astrofyzikové potřebují mít při pozorování Slunce v konfiguraci antén krátké základny, aby správně zrekonstruovali i delší prostorové škály v obraze.



Obr. 2 Jednotlivé antény observatoře ALMA se prostřednictvím speciálních transportérů mohou po planině pohybovat a rozličně přesouvat do různých uskupení. Foto: Archiv ALMA

Při pozorování Slunce byly proto dosud využívány kompaktní konfigurace v rozmezí C-1 až C-3. „Jen při nejnižších frekvencích dosáhneme na C-4 a při vyšších frekvencích jsme naopak omezeni na více kompaktní C-2,“ podotýká Miroslav Bárta. „Díky tomu jsme získali na nízkých frekvencích 100 GHz rozlišení asi 1,8 úhlové vteřiny a na těch vyšších (240 GHz) jen o málo lepší – kolem jedné obloukové vteřiny, s čímž jsme byli nejen my, ale všichni sluneční astrofyzikové silně nespokojeni – očekávání v komunitě byla prostě daleko vyšší a na výsledky svých neslunečních kolegů jsme proto hleděli se závistí. Kromě toho jiné moderní sluneční přístroje, pracující ovšem na zásadně kratších vlnových délkách, dosahují dnes řádově lepších hodnot – kupříkladu dalekohled Hinode³ se dostane až na desetinu úhlové vteřiny a vel-

3 J. Žďárská: Hinode – důležité poznatky ve výzkumu Slunce. Čs. čas. fyz. 72, 480–483 (2022).

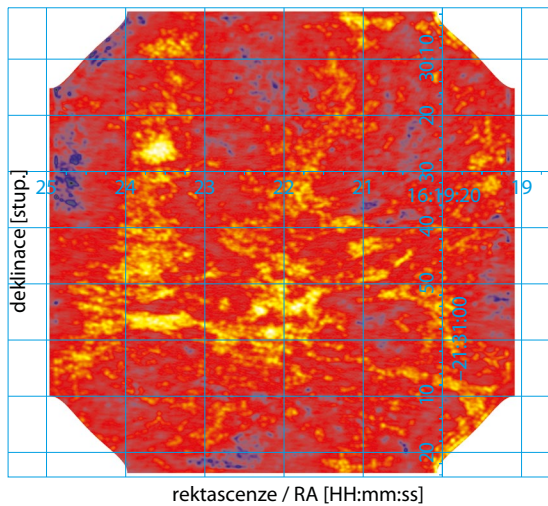


Obr. 3 Ukázka, jak divoce umí oscilovat fáze (zpoždění vlnoplochy oproti ideální očekávané rovinné vlně) na anténě DA46 v důsledku atmosférické turbulence. Tyto fázové distorze je třeba opravit pomocí kalibrace – u Slunce využíváme fakt, že během krátké doby pořízení jednoho snímku (0,2 s) se jeho obraz nezmění a rychlá variace fáze je tedy důsledkem nestabilní zemské atmosféry. Čtyři panely představují čtyři pozorované blízké frekvence, černé a červené body odpovídají dvěma nezávislým polarizacím radiového záření.

ké pozemní dalekohledy, jako GREGOR⁴ nebo DKIST⁵, mohou po matematické proceduře rekonstrukce obrazu dosáhnout ještě většího rozlišení.“

Tým Miroslava Bárty se snažil zjistit, proč observatoř ALMA nedává při pozorování Slunce obrazy v potřebném rozlišení a čím to je, že jsou limity pro sluneční pozorování ve srovnání s těmi neslunečními nastaveny tak nízko. „Při hlubším zkoumání a po diskusi s technickými experty observatoře ALMA jsme se dozvěděli, že v podstatě zásadní roli v tomto hraje způsob, jakým se ALMA vypořádává s distorzí (kažením) obrazu vlivem atmosférické turbulence, která se u přímých zobrazení projevuje jako tzv. seeing (atmosférická turbulence má svůj původ v konvekci, tedy ohřevu zemského povrchu a následně konvekci plynu v atmosféře). V tuto chvíli jsme věděli, proč nemáme obrazy Slunce v potřebném rozlišení, a začali jsme tak uvažovat nad tím, jakým

4 https://en.wikipedia.org/wiki/GREGOR_Solar_Telescope
5 https://en.wikipedia.org/wiki/Daniel_K._Inouye_Solar_Telescope



Obr. 4 Obraz malé části Slunce v dosud nevídaném rozlišení (pětkrát lepším, než kdy bylo pozorováno na této frekvenci), získaný observatoří ALMA na frekvenci 100 GHz (odpovídající vlnová délka je 3 mm). Ukazuje velmi vysokou úroveň detailu ve sluneční chromosféře.

způsobem tuto situaci vyřešit a kvalitních obrazů Slunce dosáhnout.“

Při interferometrickém pozorování lze deformace vlnoplochy vlivem atmosférické turbulence určitým způsobem korigovat. Jedním ze způsobů, jak toho dosáhnout, je použití tzv. fázového kalibrátoru, díky němuž jsou astrofyzici schopni zjistit fázová zpoždění vlny na jednotlivých anténách a poté provést potřebné korekce alespoň na dlouhých časových škálách. „*Fun- guje to tak, že během pozorování zkoumaného objektu se ALMA každých typicky 6 až 10 minut přeorientuje na blízký bodový zdroj, většinou kvasar, tzv. kalibrátor, a měří jeho skutečné fáze, ovlivněné zemskou atmosférou. Snímání kalibrátoru zabere typicky minutu, pak se všechny antény opět přesměrují zpět na svůj vědecký*

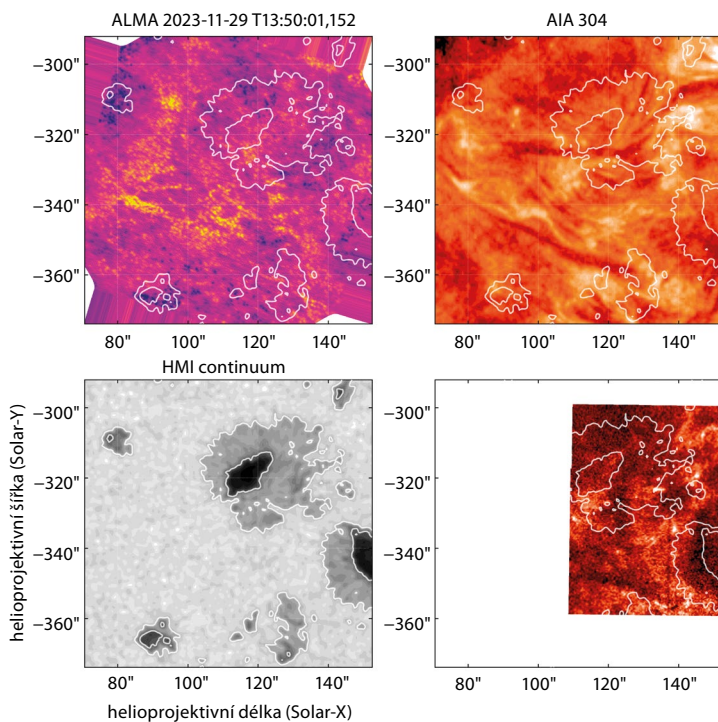
cíl. Protože u bodového zdroje jsme schopni přesně spočítat fáze za ideálních podmínek (jako by tu atmosféra vůbec nebyla), ze zjištěných rozdílů se spočte korekční tabulka a ta se poté zpětně aplikuje i na zkoumaný objekt, v našem případě Slunce. Pro časový interval, kdy je observatoř mezi dvěma kalibračními skeny zaměřena na svůj vědecký cíl, se použije lineární interpolace. Z povahy metody je jasné, že korigujeme jen fázová zpoždění na velkých škálách, způsobená velkými strukturami v atmosférické turbulenci,“ dodává Miroslav Bárta.

Problém je však na mnohem kratších časových škálách. U neslunečních objektů ALMA používá měření vlastního záření vodní páry. Intenzita její emise je dána mocností jejího sloupce nad danou anténou. „*Tloušťka*“ vrstvy vodní páry tak ovlivňuje nejen absorpci mikrovlnného záření ze zdroje, ale díky změněnému indexu lomu ovlivňuje také fázové zpoždění vlnoplochy. Tím lze využít měření intenzity vodní páry ke korekci fázových zpoždění signálů zdroje. „*Astronomové jsou například při pozorování vzdálených galaxií schopni měřit záření páry a převádět ho na fázová zpoždění s vteřinovou kadencí. U Slunce však takto postupovat nelze, protože vodní pára, která je vždycky přítomná, září na teplotě cca 150 K. Vzhledem k tomu, že teplota Slunce je 6 000 K, nastává situace, že je radiometr přezářený a nemůže měřit. A to je právě ten důvod, proč my nejsme u Slunce schopni dělat tyto krátkoškálové korekce,“ vysvětluje Miroslav Bárta.*

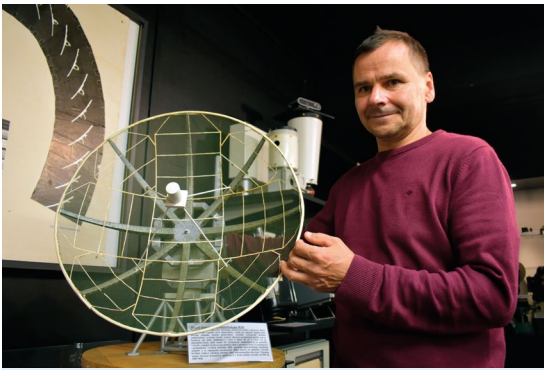
Bylo tedy třeba vyřešit, jak udělat korekce fázových zpoždění na krátkých časových škálách jinak. A to se podařilo nakonec právě proto, že je Slunce velmi jasné a díky tomu je možno jej snímkovat s vysokou kadenčí až 0,2 s na jeden snímek. To je velký rozdíl například oproti výše zmiňovaným galaxiím, které je nutno snímkovat s kadenčí minimálně 6 s, aby byly zachyceny alespoň nějaké fotony. „*Pokud se snímkování děje na časové škále pod jednu sekundu, zůstávají atmosférické ‚boule‘ takzvané zamrzlé a během této doby se nestačí nikam pohnout. Takový subsekundový snímek je sice deformovaný, nicméně koherence vln zůstává zachována. Na jednotlivých snímcích tato deformace sice je, ale my víme, že za takto krátkou dobu se sluneční atmosféra nepohne a blikání obrazu – tedy zmiňovaná deformace – proto musí být způsobeno zemskou atmosférou. Pro pozorování Slunce jsou tak dvě desetiny sekundy z hlediska citlivosti zcela dostačující, protože signálu je až přebytek.‘‘*

Díky tomuto nápadu předložil tým Miroslava Bárty v roce 2020 svoje návrhy na vylepšení metodiky jednak ESO a jednak provozovatelům ALMA k následnému posouzení. Protože od původní myšlenky je k faktické realizaci vždycky ještě dlouhá cesta, návrh byl předložen do soutěže projektů smluvního výzkumu pro ESO v programu ALMA Development Study – a uspěl. Bohužel v roce 2020 svět bojoval s virem SARS-CoV-2, a tak na přidělení finanční dotace a skutečné zahájení výzkumu bylo nutno vyčkat až do roku 2022, kdy tým získal finanční pobídku ve výši 100 000 eur. Výzkum byl odstartován v září 2022 přímo na observatoři v Ondřejově, kam dorazili i zástupci ESO a provedli zde tzv. vykopnutí – *kick-off meeting* – tedy oficiální zahájení celého projektu.

Pro testování a rozvíjení nosné myšlenky projektu bylo potřeba najít i zkušeného kolegu astrofyzika, který by se mohl této náročné problematice naplno věnovat. Tím kolegou se stal Dr. Yi Chai, který vystudoval astro-



Obr. 5 Porovnání vysoce rozlišených pozorování Slunce z observatoře ALMA na frekvenci 100 GHz (vlevo nahoře) se současnými pozorováními stejné aktivní oblasti na Slunci z kosmických přístrojů AIA (vpravo nahoře) a HMI (vlevo dole) na palubě Solar Dynamics Observatory a spektrografu IRIS (vpravo dole), pracujícího rovněž z kosmu v ultrafialové oblasti spektra.



RNDr. Miroslav Bárta, Ph.D., (*1973) pracuje jako astrofyzik na Astronomickém ústavu Akademie věd ČR v Ondřejově, momentálně na pozici zástupce ředitele pro vědeckou činnost. Vystudoval MFF UK v Praze, kde nyní vede kurzy zaměřené na radioastronomii a pokročilé partie sluneční fyziky. Postdoktorský pobyt strávil v Ústavu Maxe Plancka pro výzkum Sluneční soustavy v Lindau u Göttingenu v Německu (2008–2011). Zabývá se výzkumem sluneční aktivity – zejména milimetrovou interferometrií s observatoří ALMA a numerickým modelováním plazmových procesů ve slunečních erupcích a jejich diagnostikou s pomocí radiových pozorování. V rámci evropského ALMA Regional Center (EU ARC, jeden ze sedmi uzlů této sítě funguje jako Výzkumná infrastruktura EU ARC.CZ na ASU v Ondřejově) působí jako celoevropský koordinátor vědeckého využití observatoře ALMA pro výzkum Slunce. V letech 2014–17 se jako člen mezinárodního Solar ALMA Development Teamu podílel na vývoji specifického režimu pozorování pro výzkum Slunce a od roku 2022 vede návazný mezinárodní projekt, jehož cílem je podstatné zvýšení prostorového rozlišení u slunečních interferometrických pozorování s observatoří ALMA. Mimo své vědecké vytížení působí jako dlouholetý dobrovolný hasič. *Foto: Jana Žďárská*

fyziku ve Spojených státech amerických a nyní pracuje na Astronomickém ústavu v Ondřejově. „*Moje spolupráce s českými kolegy pokračuje zdařile. Ondřejovská observatoř je krásné místo, kde se mi i velmi dobře žije,*“ představuje svůj vztah k české astronomii Yi Chai.

Nyní již nic nebránilo tomu, aby začalo testování, které probíhalo nejprve prostřednictvím simulací. To proto, že je to dobrý a finančně nenáročný (pozorovací čas představuje, jak známo, také nemalé peníze) způsob, jak si „osahat“ prostor různých parametrů. Klíčové jsou především dva z nich, a to vlnová délka (nebo frekvence), na níž se pozoruje, a číslo, které charakterizuje úroveň atmosférické turbulence, respektive její vliv na varianci čili míru časové proměnlivosti fázových zpoždění. V závislosti na těchto dvou parametrech vědci hledali nejdelší možnou základnu prostorového rozmístění antén, na něž by pozorování ještě fungovalo – tedy jakou největší konfiguraci antén je možné vytvořit, aby bylo stále možno následný obraz Slunce bezpečně rekonstruovat. „*Pro zpracování i simulace dat jsme používali software CASA (Common Astronomy Software Application) a jako vstupní model simulací jsme použili kvalitní obrázky Slunce ze sondy Hinode, které jsme získali od kolegy ze Slunečního oddělení Jana Jurčáka a které jsme si ještě pro naše potřeby následně upravili (především zvětšili). Zjistili jsme, že abychom získali rozumný obraz Slunce, je možné využít konfiguraci antén typu C-7, která je pětikrát větší než konfigurace, jež jsme používali dosud. Situace působila nadějně a simulace nám ukázaly, že při pozorování v 100 a 200 GHz jsme schopni dosáhnout konfigurace C-7 a C-6 (což jsou ma-*

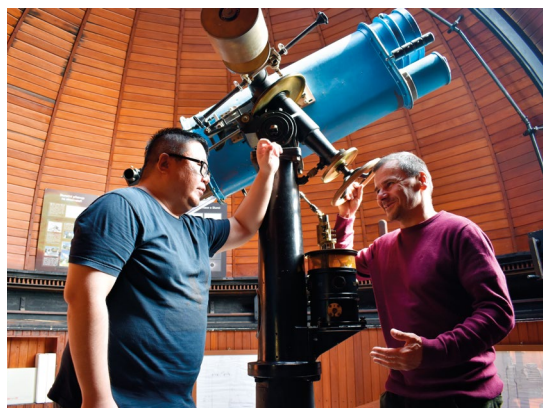


Dr. Yi Chai (*1988) je postdoktorand Slunečního oddělení Astronomického ústavu AV ČR v Ondřejově. Magisterský i doktorský obor vystudoval na New Jersey Institute of Technology (NJIT), kde získával i první vědecké zkušenosti v oblasti sluneční radioastronomie. Od října 2022 se plně věnuje práci na projektu ESO ALMA Development Study, řešeném na ASU v Ondřejově. Jeho hlavním vědeckým zájmem je dynamika atmosféry v aktivních oblastech Slunce, zejména oscilace a vlny ve slunečních skvrnách. Je uznávaným expertem na zpracování interferometrických dat slunečních pozorování z observatoře ALMA.

Foto: Jana Žďárská

xima). Proto jsme skončili se simulacemi a vyžádali jsme si pozorovací čas, abychom mohli naše teorie ověřit experimentálně,“ dodává Miroslav Bárta.

V rámci experimentálního ověření se ukázalo, že nápad, který vědci v projektu předložili, skutečně funguje a výsledky simulací se tak potvrdily. Díky své snaze a vytrvalosti se tým Miroslava Bárty dostal se svými výsledky na úroveň těch nejlepších optických dalekohledů, a to s rozlišením pětikrát větším, než dosud ALMA poskytovala. A vynikající je i to, že tímto způsobem byla získána naprosto unikátní data, která nemá nikdo na světě. „*Na počátku byla motivace, tedy to, že jsme chtěli pozorovat Slunce v lepším rozlišení. A také přesvědčení o tom, že by to mohlo jít, protože nám stačí velice krátké snímky a signálu je evidentně dost. Nyní jsme ve fázi, kdy jsou naše ideje experimentálně ověřeny a máme výsledky, které chceme použít nejen pro vývoj metodiky, ale i pro klasický vědecký výzkum. Zároveň bychom rádi vyvinuli takovou matematickou proceduru, která odstraní časovou náročnost zpracování obrazů či dat,*“ připomíná Yi Chai.



Obr. 6 Do projektu se zapojil i zkušený astrofyzik Dr. Yi Chai, který vystudoval astrofyziku ve Spojených státech amerických. „*Moje spolupráce s českými kolegy pokračuje zdařile. Ondřejovská observatoř je krásné místo, kde se mi i velmi dobře žije,*“ rozhodl své nové „přesoceánské“ působiště Yi Chai. *Foto: Jana Žďárská*



Obr. 7 Spolupráce Československého časopisu pro fyziku a Astronomického ústavu AV úspěšně funguje již mnoho let a my v redakci si jí velice ceníme. Na obrázku zleva Miroslav Bárta, Jana Žďárská a Yi Chai. Foto: Yi Chai

Pokud bychom se pokusili shrnout celý průběh – mohli bychom říci, že vědci týmu Miroslava Bárty nejprve prostřednictvím simulací zmapovali, kam až lze posunout hranice prostorového rozlišení v závislosti na atmosférických podmínkách a použité vlnové délce a při následném experimentálním ověření závěry svých simulací potvrdili. Jako vedlejší produkt této nové metodiky, která v budoucnu umožní pozorování Slunce s vysokým rozlišením všem uživatelům observatoře ALMA, tak vědci získali dvě zcela unikátní sady dat s rozlišením pětkrát větším, než jakákoli dosud provedená pozorování Slunce na milimetrových vlnových délkách. „Obecně řečeno, výsledky projektu radikálně zlepšují prostorové a časové rozlišení oproti současným slunečním pozorováním s observatoří ALMA. To pomůže astronomům z komunity slunečních astrofyziků výrazně lépe porozumět dynamice jemné struktury ve sluneční atmosféře,“ připomíná Yi Chai.

Pozorovat Slunce je velmi důležité, především proto, že je to naše nejbližší a pro výzkum poměrně dostupná hvězda. Díky tomu se lze dozvědět nejen mnoho důležitých informací, které je poté možné aplikovat i na výzkum mnohem vzdálenějších hvězd, ale i z toho důvodu, že život na Zemi je na Slunci a pochodech v něm probíhajících plně závislý. A myslím, že by bylo dobré připomenout na závěr i větu, kterou Miroslav Bárta pronesl jako první při našem setkání: „Dva světy na sebe narazily a proluly se...“ A já si dovoluji dodat, že možná světy tři – kdy tím třetím byli a jsou neúnavní vědci, kteří se jen tak nevzdali, napínali své síly a trpělivě, krůček po krůčku, postupovali k vylepšení svých vědeckých metod a výsledků. Protože každá nová takto získaná informace má pro další směřování astrofyzikálního výzkumu Slunce velmi významnou hodnotu. Přejeme proto vědeckému týmu Miroslava Bárty mnoho dalších úspěchů a na naše šikovné české vědce jsme velice pyšní.



Obr. 8 Výsledky projektu radikálně zlepšují prostorové a časové rozlišení oproti současným slunečním pozorováním s observatoří ALMA. To pomůže astronomům z komunity slunečních astrofyziků výrazně lépe porozumět dynamice jemné struktury ve sluneční atmosféře. Foto: Jana Žďárská

TIPY NAKLADATELSTVÍ **ACADEMIA**

Navštivte naše nové webové stránky a nový e-shop: www.academia.cz / www.academiaknihy.cz