

# Čeští vědci naučili observatoř ALMA pozorovat Slunce

Jana Žďárská

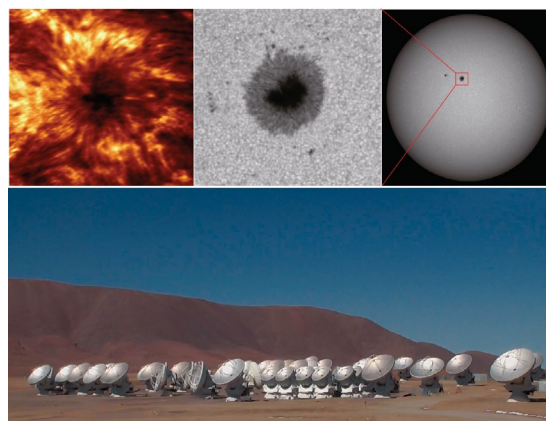
Fyzikální ústav AV ČR, Na Slovance 2, 182 21 Praha 8

ALMA (Atacama Large Millimeter Array) je zbudována na plošině Chajnantor v severním Chile ve výšce 5 040 m n. m. Svými 66 velice přesnými dvanáctimetrovými anténami ve tvaru parabolických zrcadel otevřela nové okno do vesmíru v oblasti mikrovln o délkách 0,3–9 mm. Jejich prostřednictvím nabízí neočekávaný pohled na mnoho astrofyzikálních jevů od objektů Sluneční soustavy až po nejvzdálenější oblasti kosmu.

Observatoř ALMA je společným projektem ESO, americké NRAO a japonské NAOJ a prostřednictvím podpůrné infrastruktury tzv. regionálních center ALMA („regionální“ zde ovšem znamená kontinentální, na celém světě jsou jen tři, a to v Severní Americe, Evropě a Asii) umožňuje velmi přesné pozorování astronomům celého světa. Je důležité, že jeden z uzlů Evropského regionálního centra ALMA je právě v ČR, jež do projektu vstoupila v roce 2009. Prostřednictvím observatoře ALMA lze pozorovat také Slunce. Pro tento typ pozorování bylo třeba vyvinout speciální pozorovací režim (*Solar ALMA Observing Mode*). Na jeho vývoji se z pověření ESO významně podíleli i čeští vědci. Rozvoj procedury slunečních pozorování stále pokračuje a český uzel je i nadále u toho – momentálně v roli celosvětového koordinátora pro vývoj kalibračních a zobrazovacích procedur primárních slunečních dat observatoře ALMA. Abychom se o této problematice dozvěděli více, zeptali jsme se na podrobnosti RNDr. Miroslava Bárty, Ph.D., astronoma ze Slunečního oddělení Astronomického ústavu Akademie věd ČR, který má evropský sluneční výzkum prostřednictvím observatoře ALMA na starosti.

■ **Jana Žďárská:** *Pracujete v českém uzlu Evropského regionálního centra ALMA, tzv. „ARC“. Můžete nám na začátku našeho rozhovoru říci, co je cílem ARC a jejich uzlů a jaká je vaše role?*

Miroslav Bárta: Observatoř ALMA je relativně nový (oficiální zahájení provozu proběhlo v roce 2013) špičkový přístroj astrofyzikálního výzkumu. Díky ní se nám otevírá pomyslné nové okno do vesmíru a do procesů v něm probíhajících. Můžeme tak například zkoumat chemii vzdálených končin kosmu. Evropské regionální centrum ALMA (EU ARC) je pak prodlouženou rukou samotné observatoře. Moje pozice jako evropského koordinátora pozorování Slunce je poměrně náročná. Dá se říci, že se všechny evropské projekty slunečního výzkumu sejdou na mém pracovním stole. Jsem poté ten, kdo se domlouvá s dalšími regionálními centry ALMA a v závislosti na pozorovacích podmínkách zpracovává detailní pozorovací program. Nejvíce



Příležitost pozorovat Slunce prostřednictvím observatoře ALMA dodnes považují za životní šanci.

časů nám ovšem zabere zpracování dat, které děláme jako servis pro observatoř. Kromě našeho vlastního výzkumu v oblastech galaktické a extragalaktické astronomie – zde bych rád uvedl nedávné úspěšné pozorování vyfukování molekulárního plynu z pohyblivé galaxie získané observatoří ALMA v rámci vědeckého projektu vedeného Dr. Pavlem Jáchymem, vedoucím našeho uzlu – a sluneční fyziky se tedy zabýváme především podporou evropských astronomů, kteří chtějí prostřednictvím observatoře ALMA pozorovat. V oblastech „neslunečního“ výzkumu se staráme zejména o uživatele ze střední a východní Evropy. V pozorování Slunce jsme v Evropě jediným uzlem s touto expertizou, a proto také zodpovídáme za všechny evropské projekty v tomto oboru.

■ **JŽ:** *Pojďme se ale vrátit na začátek, do doby vašeho dětství. Jste zkušený sluneční fyzik a uznávaný astronom. Zajímali jste se o Slunce či astronomii již od dětského věku?*

MB: Dá se říci, že ano. Vzpomínám si, že když mi bylo 13 let, prolétala kolem Země Halleyova kometa. Náš známý vědec a popularizátor Dr. Jiří Grygar v té době v TV radil, jak vylepšit optiku východoněmecké stavebnice hvězdářského dalekohledu náhradou plas-

tového objektivu skleněnou brýlovou čočkou zbrúsenou na 45 mm, aby „pasovala“ do tubusu. Nelenil jsem a hned jsem se do stavby svého malého „teleskopu“ pustil. Maminka o mém zájmu věděla a právě tehdy mi koupila knihu „Vesmír“ autorů Grygara, Horského a Mayera. Začal jsem navštěvovat hvězdárnu u nás ve Vlašimi a dostal se tak i k opravdovému dalekohledu. Naprosto jsem tomuto koníčku propadl a byl jsem tak doslova vtažen do spleťových pavučin astronomie.

■ **JŽ:** *Jste odborníkem na pozorování Slunce. Kdo vás právě k tomuto vesmírnému tělesu nasměroval?*

MB: To má na svědomí také hvězdárna Vlašim. Když jsem ji začal navštěvovat, byl zde vedoucím pan Jan Zajíč. Byl to nadšený astronom amatér a umožnil mi navštěvovat hvězdárnu i v době, kdy nebylo pro veřejnost otevřeno. Pokaždé mi půjčil klíče a já mohl nerušeně pozorovat. Byla to opravdu krásná doba. Dr. Křivský v těch letech provozoval ve spolupráci s amatérskými astronomy program FOTOSFEREX, což byla svého druhu národní služba pro systematické sledování sluneční aktivity. Vlašimská hvězdárna se ho účastnila. Brzy jsem se do pozorování zapojil také a den co den trpělivě zakresloval a počítal sluneční skvrny. Hrdě jsem poté nesl protokol se zákresem svého pozorování na poštu k odeslání na Astronomický ústav v Ondřejově.

■ **JŽ:** *Vystudoval jste gymnázium a poté i Matematicko-fyzikální fakultu UK. Zde jste se setkal s prof. Marianem Karlickým a bylo to výjimečné setkání. Jak vás do budoucna ovlivnilo?*

MB: Matematicko-fyzikální fakultu a její katedru astronomie a astrofyziky jsem přirozeně vnímal jako metu a milník v mém studiu výzkumu vesmíru. Už na škole jsem se zajímal o radiový výzkum Slunce. Uvažoval jsem o tom, že bych se otázkám výzkumu Slunce věnoval i ve své diplomové práci. Setkání s prof. Marianem Karlickým považuji za velký dar, velmi mnoho mě naučil a stal se posléze i mým školitelem. Pod jeho vedením jsem vypracoval svoji diplomovou práci a později – to již na Ondřejově – i Ph.D. doktorát.

■ **JŽ:** *Zakotvil jste na ondřejovské observatoři a dostal jste příležitost zapojit se do programu ESO. Postupně jste se stal vedoucím českého uzlu evropského centra ALMA a poté i neformálním koordinátorem evropského slunečního výzkumu. Jak jste takový rychlý kariérní postup vnímal?*

MB: Hned po nástupu do Ondřejova jsem se zabýval výzkumem Slunce, a to především v oblasti numerického modelování slunečních erupcí na super-



**RNDr. Miroslav Bárta, Ph.D.** (\*1973) je český astrofyzik. Vystudoval MFF UK v Praze, kde nyní působí jako externí přednášející. Postdoktorandský pobyt strávil na Ústavu Maxe Plancka pro výzkum Sluneční soustavy v Lindau u Göttingenu v Německu (2008–2011). Pracuje na Astronomickém ústavu Akademie věd ČR v Ondřejově jako vedoucí Oddělení sluneční fyziky a zabývá se výzkumem sluneční aktivity – zejména počítačovým modelováním procesů ve slunečních erupcích, jejich diagnostikou s pomocí radiových a mikrovlnných pozorování a mikrovlnnou interferometrií s observatoří ALMA. Je autorem projektu MŠMT – EU ARC.CZ – Národní výzkumná infrastruktura (účást ČR v projektu ALMA). V letech 2015–2016 byl jeho prvním vedoucím. Vedl evropskou (ESO) účast na vývoji specifického režimu pozorování Slunce s observatoří ALMA (2014–2017). Nyní působí jako evropský koordinátor jejího vědeckého využití pro výzkum Slunce včetně vývoje celosvětově závazné procedury pro zpracování všech slunečních dat z observatoře ALMA a správu její centrální dokumentace.

počítačích a jejich diagnostikou s pomocí našich radiových spektrografů. To, že jsem mohl později vstoupit a vést přípravu procedur pro pozorování Slunce prostřednictvím špičkové radioastronomické observatoře ALMA, dodnes považuji za životní šanci.

■ **JŽ:** *Pozorování Slunce prostřednictvím ALMA počátku nebylo možné. Jak jste ji vy, čeští vědci, „naučili“ ve spolupráci s vašimi kolegy z USA a Japonska Slunce pozorovat?*

MB: Vědecký výzkum Slunce observatoří ALMA byl plánován od samého jejího počátku. Nicméně nešlo to „samo“. Bylo především nutné vytvořit procedury, které překonají náročné problémy, jež pozorování Slunce představuje. Práci na tomto úkolu se zúčastnili vědci z USA, Japonska a Evropy. Náš uzel byl ESO pověřen, abychom evropskou účast vedli. Jedním z našich úkolů poté bylo, jak to zařídit, aby bylo možné pozorovat s tímto citlivým přístrojem i velmi jasné Slunce a přitom nemít obrázek „přeexponovaný“. Také jsme museli vyřešit problém vlastního pohybu Slunce a objektů na něm mezi hvězdami. Naše procedury jsme nakonec testovali přímo v Chile, konkrétně metodu zeslabení signálu, která zabraňuje přeexponování. Model jsme odzkoušeli na pozorování Měsíce a výsledky nás velmi uspokojily. V roce 2016 ALMA schválila uvedení slunečních pozorování do provozu a od roku 2017 již probíhají konkrétní výzkumy a ty nesou své první výsledky. K překvapivým zjištěním získaným díky těmto raným vědeckým pozorováním Slunce s observatoří ALMA jistě patří poněkud nečekaná emise na vlnové délce 3 mm v atmosféře přímo nad centrem jinak tmavých slunečních skvrn nebo neočekávaný obraz tzv. filamentů, tmavých vláken pozorovaných



Celkový pohled na uskupení antén ALMA na AOS (5 000 m n. m.).

» Jsme první generace, které studují vesmír před miliardami let – jak se tvořil.

SANDRA FABEROVÁ,

ASTRONOMKA,

1944



Antény hlavního pole o průměru 12 m pozorující Slunce.

v červené čáře atomárního vodíku H $\alpha$ : ALMA má potenciál změnit naše dosavadní představy o sluneční atmosféře, proto s napětím očekáváme další zajímavé objevy v oblasti sluneční fyziky.

■ JŽ: Domníváte se, že by ALMA mohla pomoci vyřešit známý paradox horké sluneční koróny (na povrchu Slunce cca 6 000 K, sluneční koróna cca 1–2 milionů K)?

MB: Jde o jednu z dlouhotrvajících otázek, jejíž řešení je dosud velmi nejednoznačné. Dilema spočívá v zásadě v tom, zda k ohřevu horní chromosféry, kde teplota začíná směřem do koróny stoupat, dochází především díky vlnám, nebo díky disipaci proudu. Protože ALMA pozoruje chromosféru, mohla by k řešení tohoto problému přispět – ostatně projekty na pozorování v tomto směru již existují. Aby se to však podařilo, musí náš mezinárodní vývojový tým ještě překonat technické potíže, které observatoř omezují ve slunečních pozorováních se skutečně vysokým prostorovým rozlišením. Právě s cílem pokročit v této oblasti podal náš onějševský uzel EU ARC projekt na následnou studii na vylepšení slunečního pozorovacího režimu do výzvy ALMA Development Study, vyhlášené v září 2019. Návrh studie cílí na prozkoumání možností využití rozlehlých konfigurací anténního pole ALMA i pro sluneční výzkum, což dosud není možné. Pokud ESO a ALMA náš projekt schválí, stane se náš uzel leaderem příslušného konsorcia evropských, amerických a japonských institucí, které se spolu s námi budou na tomto zásadním vylepšení slunečního módu ALMA podílet. Nicméně ALMA není jediný průlomový přístroj použitelný i ve slunečním výzkumu – odpověď na otázku ohřevu koróny by mohla přinést i loni vypuštěná kosmická sonda Parker Solar Probe, která se na Slunce podívá opravdu zblízka.

■ JŽ: Pozorování galaxií je kupodivu jednodušší nežli pozorování Slunce. Jak jste se s tímto náročným úkolem vypořádali?

MB: Slunce je především veliký objekt, který zabírá celé zorné pole antény. Také je mnohem jasnější a mezi hvězdami se pohybuje. Pozorování Slunce je díky tomu i dalším potížím náročnější než pozorování

jiných vesmírných objektů. Vývoj speciálního režimu pro pozorování Slunce byl tedy poměrně složitý proces a nebylo jisté, zda se to vůbec podaří. Ale my jsme se nevzdali a nakonec jsme observatoř ALMA pozorovat Slunce naučili.

■ JŽ: Jakým způsobem observatoř ALMA a její infrastruktura pracuje? Jak probíhají pozorování?

MB: Vlastní observatoř se nachází v Chile, a to ve dvou areálech vzdálených od sebe cca 30 km. Ten horní, známý v našem slangu jako AOS, se nachází v nadmořské výšce přes 5 000 m. Tam je umístěno 54 velmi přesných dvanáctimetrových antén, doplněných natěsně uspořádaným „hloučkem“ o něco menších sedmimetrových antén (tzv. ACA – Atacama Compact Array), a obří počítač (tzv. korelátor), který jejich signál složitě kombinuje, abychom nakonec matematickou procedurou získali obraz pozorovaného místa na obloze na milimetrových vlnách. Kromě několika techniků, kteří se starají o provoz a střídají se tu kvůli náročnosti vysokohorského prostředí v krátkých směnách, a zdravotníka, který je v případě potřeby „křísí“, tam již nikdo další není.

■ JŽ: Odkud jsou tedy pozorování vlastně prováděna?

MB: Pozorování jsou realizována z „dolního“ centra, známého jako OSF, ve výšce necelých 3 000 m. Tam astronomové, kteří mají službu po čas své týdenní směny, také bydlí. ALMA ovšem není jen observatoř v Chile. Projekty pozorování je třeba napřed připravit a naprogramovat, a poté také výsledná data zpracovat, abychom z těch počítačových jedniček a nul a spousty šumu získali správné obrázky. Právě k tomu slouží celosvětová síť ALMA regionálních center – ARC (ALMA Regional Center) –, v jejímž rámci fungujeme. Vedle toho se infrastruktura ARC podílí i na dalším rozvoji observatoře, což je náš příspěvek k vývoji slunečního pozorovacího režimu. To, že jsme pomáhali naučit observatoř ALMA pozorovat Slunce a v rozvoji jejích „schopností“ v tomto směru i nadále pokračujeme, je jedním z našich nejvýraznějších přínosů.

■ JŽ: Prostředí, v němž se ALMA nachází, je považováno za unikátní, a to nejen z hlediska vynikajících pozorovacích podmínek. Jak jste se vy sám cítil tak vysoko nad okolní krajinou v prostoru neživoucí pouště s tím prý nejmodřejším nebem nad hlavou?

MB: Byl jsem nadšen, protože je to nezapomenutelný zážitek. A to nejen proto, že se člověk musí na takovou návštěvu dobře připravit a aklimatizovat. První pocit byl ten, že jsem se snad ocitl na Marsu. Krajina je v červenavém odstínu, kolem kamenná poušť a antény. I vozidla, kterými jsme cestovali na AOS, jsou této vysoké nadmořské výšce přizpůsobena – mají výkonné turbomotory. V oblasti je minimální vlhkost a nejsou zde propady denních a nočních teplot. Je to naprosto dokonalé místo na pozorování.

■ JŽ: Jaká je noční obloha nad observatořmi ALMA? Nemátlo vás například zdánlivě odlišné postavení hvězd?

MB: Jižní obloha je v noci víc než nádherná. Člověk ani nepotřebuje dalekohled a může leccos pozorovat pouhým okem, protože je zde více jasných hvězd. I Mléčná dráha je bohatší. Můžete pozorovat Magellanovy oblaky a pověstný Jižní kříž. Zajímavostí je, že je tam vlastně všechno jiné, všechno vzhůru nohama.

My jsme zvyklí, že Slunce vidíme na jihu. Ale tady je to naopak. Slunce vidíme na severu a po obloze putuje opačným směrem. Fáze Měsíce jsou zde také prohozené. Když je Měsíc ve tvaru C, tak dorůstá, zatímco když je ve tvaru D, tak couvá. I souhvězdí jsou opačně jakoby postavená na hlavu – a putují přes sever, a ne přes jih. Orientace na obloze je tam docela oříšek.

■ **JŽ:** Pomáhal jste učit observatoř ALMA pozorovat Slunce a nadále řídíte jeho pozorování v rámci Evropy. Zbývá vám ještě čas na další vědeckou práci?

MB: Máte pravdu, hodně času mi zabírají servisní činnosti pro observatoř ALMA, zejména zpracování dat z pozorování Slunce pro evropské projekty. A část kapacity mi berou i organizační a personální záležitosti. Nyní třeba řeším personální obsazení našeho týmu. Právě jsme získali novou posilu ze zahraničí, což s sebou nese radost, ale také spoustu papírování. Náš úspěch v mezinárodně uznávaném týmu se totiž jaksi rozkříkl a rázem máme i mnoho zájemců o práci. Na jednu stranu je jistě povznášející, že vykonáváte důležitou službu, kterou nikdo jiný udělat nemůže, protože ta kvalifikace a expertiza je v Evropě dosud jen na českém uzlu ALMA centra. Z druhé strany je to ale pořád služba a moje vlastní nápady čekají tiše v šuplíku. Občas si u toho vzpomenu na Keplerův výrok (kterému díky tomu až teď rozumím): „*Kéž mě Bůh propustí z astronomie, abych se mohl věnovat tajemství harmonie Vesmíru.*“

■ **JŽ:** Jakých svých vědeckých výsledků si nejvíce ceníte?

MB: Ze skutečně vědeckých výsledků je to asi už časem prověřený výsledek počítačové simulace postupného kaskádního ztenčování proudové vrstvy při rekonexi magnetického pole ve vysoce vodivém prostředí. Má to důležitou aplikaci ve fyzice slunečních erupcí. Technickými triky jsme dosáhli toho, že počítačová simulace byla schopna pokrýt celou obrovskou oblast erupce (200 tisíc km) a přitom mít lokálně rozlišení pouhé 3 km. Potvrdili jsme tím přítomnost už dříve teoreticky předpokládané kaskády. A nejen to. Naše simulace nově odhalily, že k fragmentaci, a to velmi bouřlivé, dochází i během splývání magnetických struktur, tzv. plazmoidů. To vneslo nové světlo i do obecné teorie turbulence v magnetohydrodynamice. Druhý úspěch, za který jsem velice rád, že jsem se na něm mohl svou účastí podílet, není tak úplně striktně ve smyslu vědeckého výsledku nebo objevu, ale jde o významné zapojení české astronomie do skutečně špičkového velkého mezinárodního projektu dlouhodobého charakteru.



Dr. Stephen White (NA ARC) a Dr. Miroslav Bárta (EU ARC).



Společný snímek účastníků Solar ALMA Observing Campaign 2014 v řídicím středisku operací ALMA OSF (cca 3 000 m n. m.).

Mám na mysli právě naši účast v projektu observatoře ALMA, to, že v ČR funguje jeden ze sedmi uzlů Evropského ALMA centra (EU ARC) a od roku 2015 se statusem velké výzkumné infrastruktury ČR. Především naše v evropském kontextu unikátní expertiza pro sluneční výzkum s ALMA dělá z našeho uzlu – byť v úzkém a specifickém segmentu výzkumu – skutečně světově špičkové pracoviště.

■ **JŽ:** A jaké jsou vaše plány do budoucna?

MB: Tak především, že vytáhnu svoje vlastní projekty z toho šuplíku. Mám jich tam požehnaně... Rozpracovaný mám analytický model rovnovážné konfigurace magnetického pole a plazmatu nad skvrnkou nebo jiným magnetickým elementem na Slunci. To je důležité jako vstupní model pro počítačové simulace šíření vln v magnetických strukturách ve sluneční atmosféře. Jde o moderní obor tzv. koronální seismologie, přesné diagnostické metody pro určení parametrů plazmatu a magnetického pole ve sluneční koróně. Se svým doktorandem a dalšími spolupracovníky se věnuji budování pokročilých počítačových modelů slunečních erupcí s pomocí moderních metod numerické matematiky. Těším se, až se tomuto tématu budu moci věnovat více, a chtěl bych výsledky simulací propojit i s daty získanými z observatoře ALMA. V nejbližší době se chystám více věnovat i technické stránce našeho vlastního čerstvě upgradovaného digitálního slunečního radiového spektrografu, umístěného v on-dřejovském desetimetrovém radioteleskopu. I kolem slunečních pozorování s ALMA mám další plány: Procedura na zpracování slunečních dat, kterou jsme pomáhali vyvíjet a udržujeme ji na centrální úrovni, by potřebovala zásadnější vylepšení. Zde bych rád uplatnil i svoje zkušenosti z počítačového modelování na superpočítačích a vnesl do zpracování dat z ALMA prvek paralelních výpočtů s pomocí prostředí MPI, což se dosud příliš nevyužívá. Výsledky v tomto směru si s americkými a japonskými kolegy vyměníme na workshopu zaměřeném na pokročilé metody interferometrického zobrazování slunečních dat z observatoře ALMA, který společně chystáme už v březnu 2020 v Santiagu de Chile. A samozřejmě – pokud bude přijat náš výše zmíněný návrh na upgrade slunečního pozorovacího režimu – mám o spoustu zábavy postaráno.

JŽ: Děkuji vám za zajímavý rozhovor a dovoluji si podotknout, že nejen já, ale i naši čtenáři jsme hrdí a pyšní na naše české vědce.

» Naše simulace nově odhalily, že k fragmentaci, a to velmi bouřlivé, dochází i během splývání magnetických struktur, tzv. plazmoidů. «