Na čem pracujeme: Exotická rádiová vzplanutí vysvětlena pomocí numerické simulace

5.8.2026 - Michal Švanda | Astronomický ústav AV ČR

Rádiové záření je jedním ze základních diagnostických nástrojů popisujících dění v aktivních procesech na Slunci, zejména erupcích. Některé typy záblesků jsou běžné, jiné se objevují jen zřídka, a to je činí zajímavými. Takzvané pomalu kladně driftující sluneční rádiové záblesky patří mezi ty exotické, jejichž původ dosud nebyl spolehlivě vysvětlen. Mezinárodní tým vědců poprvé vytvořil model, který propojuje skutečná pozorování Slunce s detailními numerickými simulacemi od globální struktury magnetického pole až po mikroskopické děje v plazmatu a pracovníci ASU byli u toho. Výsledky ukazují, že tyto rádiové záblesky pravděpodobně vznikají působením elektronových svazků šířících se podél magnetických smyček ve sluneční koróně.

Slunce je dynamická hvězda, jejíž atmosféra je neustále měněna procesy ve složitých magnetických polích. Při slunečních erupcích se během několika sekund uvolní obrovské množství energie, která zahřeje okolní plazma a urychlí elektrony i další částice na vysoké rychlosti. Tyto částice se následně pohybují podél magnetických siločar a při svém letu mohou vyvolávat nejrůznější druhy elektromagnetického záření – od rentgenového až po rádiové vlny. Právě rádiové emise představují jedinečný prostředek ke studiu procesů, které probíhají v prostředí sluneční koróny, kam běžnými optickými metodami nelze přímo nahlédnout.

Sluneční fyzika zná celou řadu slunečních rádiových záblesků různých typů, mezi nimi existuje i velmi vzácná skupina označovaná jako pomalu kladně driftující záblesky (SPDB – Slowly Positively Drifting Bursts). Na dynamických spektrech, tedy dvojrozměrném záznamu, kde se na jednu osu vynáší čas a na druhou frekvence a zobrazuje se rádiový tok, se projevují tím, že jejich frekvence během několika sekund pomalu roste. To naznačuje, že zdroj záření postupuje směrem do hustších vrstev sluneční atmosféry. Přestože jsou tyto záblesky známy již řadu let, jejich fyzikální původ zůstával nejasný. Bylo navrženo několik možných vysvětlení, například rázové vlny, čela tepelných front nebo pohyb plazmových struktur ve smyčkách, žádný z těchto scénářů však dosud nedokázal uspokojivě propojit pozorované vlastnosti s fyzikálními procesy probíhajícími na mikroskopické úrovni.

Tuto mezeru překračuje představovaná studie, na níž se významně podíleli vědci ze Slunečního oddělení ASU. Jejím hlavním cílem není pouze vysvětlit konkrétní pozorovaný rádiový záblesk, ale především vytvořit jednotný model, který propojí velkorozměrovou strukturu magnetického pole ve sluneční koróně s pohybem energetických elektronů a nakonec i se samotným vznikem rádiového záření. Jde o první práci svého druhu, která využívá skutečná pozorování jako přímý vstup do celé řady na sebe navazujících numerických simulací.

Autoři vyšli z dobře zdokumentované erupce z 10. května 2014, během níž byly na ondřejovském rádiovém spektrografu RT5 zaznamenány tři skupiny SPDB. Přístroje sítě CALLISTO rozšířily pozorování do nižších frekvencí a umožnily lépe určit průběh těchto rádiových emisí. Současně byla k dispozici i pozorování družice SDO v ultrafialové oblasti a magnetogramy z přístroje HMI, takže bylo možné hledat souvislosti mezi rádiovými záblesky a konkrétními oblastmi sluneční erupce. Analýza ukázala, že časový průběh rádiového signálu nejlépe odpovídal zjasnění určitých erupčních jader, což umožnilo odhadnout oblast, odkud byly elektronové svazky pravděpodobně uvolněny.

Přelomová je však samotná metodologie. Autoři vytvořili třístupňový numerický model, který propojuje děje probíhající na zcela odlišných prostorových i časových škálách. V prvním kroku rekonstruovali trojrozměrné magnetické pole aktivní oblasti metodou extrapolace. Z modelu vybrali magnetickou smyčku, která propojovala podezřelá místa odhalená z ultrafialových pozorování. Takto byla postavena magnetická smyčka odpovídající pozorované oblasti erupce. Podél této smyčky následně vytvořili model rozložení hustoty koronálního plazmatu založený na hydrostatické rovnováze. Hustota plazmatu byla nastavena tak, aby odpovídala frekvencím skutečně pozorovaných rádiových záblesků. Tím bylo zajištěno, že simulace vychází z fyzikálních podmínek co nejbližších reálnému Slunci.

Ve druhém kroku sledovali pohyb energetických elektronů podél rekonstruované magnetické smyčky v přiblížení, které ignoruje gyrační pohyb částic v magnetickém poli. Elektrony byly uvolněny poblíž vrcholu smyčky s průměrnou rychlostí přibližně 15 % rychlosti světla, což odpovídá energii asi 7 keV. Tato hodnota nebyla zvolena náhodně – právě takové relativně pomalé elektronové svazky naznačovala předchozí pozorování SPDB. Simulace následně sledovala systematický pohyb elektronů a brala v úvahu nejrůznější efekty, jako například odraz od magnetických zrcadel v silnějším poli, rozptyl vlivem turbulence nebo průnik do spodních vrstev atmosféry. V různých okamžicích byla zaznamenána jejich rychlostní rozdělení ve třech charakteristických oblastech – u vrcholu smyčky, v její střední části a poblíž paty. Tyto okamžiky odpovídaly časovému vývoji skutečně pozorovaného čtyřsekundového rádiového záblesku.

Ve třetím kroku byly takto získané rozdělení rychlostí elektronů použity jako vstup do plně kinetických simulací metodou Particle-in-Cell. Tento typ simulací již nepopisuje částice pouze statisticky, ale počítá jejich vzájemné interakce s elektromagnetickými poli přímo z fyzikálních zákonů. Díky tomu lze sledovat vznik plazmových nestabilit, buzení Langmuirových vln i jejich následnou přeměnu na rádiové záření. Právě tato část představuje propojení mezi makroskopickým světem magnetických struktur a mikroskopickou fyzikou jednotlivých částic.

Výsledky ukázaly, že elektronové svazky si i po několika sekundách vývoje zachovávají dostatek energie k vyvolání plazmových nestabilit. Jak elektrony postupují od vrcholu smyčky směrem k jejím patám, jejich rozdělení se postupně mění. Přesto zůstává zachována charakteristická nerovnováha potřebná pro vznik intenzivních Langmuirových vln, které představují první krok při vzniku rádiového záření. Nejintenzivnější buzení těchto vln nastává poblíž vrcholu magnetické smyčky. Směrem dolů jejich intenzita postupně slábne. Ubývá energetických elektronů, sílí magnetické pole a mění se vlastnosti okolního plazmatu. Všechny tyto změny snižují účinnost mechanismu, který převádí energii elektronového svazku do rádiového záření. Výpočty přitom reprodukovaly právě takový vývoj intenzity, jaký odpovídá pozorovaným vlastnostem SPDB. Použitý elektronový svazek, který dobře reprodukuje pozorované chování SPDB, je relativně pomalý, takže plazmové vlny vznikají především se základní plazmovou frekvencí. Harmonická složka je zde velmi slabá, což dále odlišuje SPDB od běžnějších rádiových vzplanutí, například reverzního typu III. Model reprodukuje přibližně čtyřsekundové trvání záblesku i jeho pomalý frekvenční drift.

Od jiných studií se tato odlišuje mimo jiné tím, že nepracuje s idealizovanými podmínkami, ale vychází z reálných pozorování konkrétní sluneční erupce. Magnetická konfigurace, hustota plazmatu, rychlosti elektronů i časový vývoj byly odvozeny z měření a teprve poté použity jako vstup do numerických simulací. Díky tomu vznikl ucelený řetězec spojující pozorování Slunce s fyzikálními procesy probíhajícími na úrovni jednotlivých částic. Takové propojení bylo dosud při studiu těchto rádiových záblesků velmi obtížné.

M. Yousefzadeh, M. Karlický, A. Koval a kol., *Kinetic Processes to Radio Burst: First Observational-driven Study in Coronal Loops*, Astrophysical Journal (2026) v tisku, preprint arXiv:2607.06991

https://www.asu.cas.cz/articles/2596/19/na-cem-pracujeme-exoticka-radiova-vzplanuti-vysvetlena-pomoci-numericke-simulace