Na čem pracujeme: Když se magnetické siločáry trhají zevnitř -- nový pohled do nitra sluneční erupce

23.12.2025 - J. Kašparová, J. Dudík, M. Karlický, A. Zemanová | Astronomický ústav AV ČR

Sluneční erupce patří k nejenergetičtějším jevům ve Sluneční soustavě, ale jejich vnitřní průběh zůstává i dnes jen částečně pochopen. Studie Jany Kašparové z ASU a jejích kolegů ukazuje, že klíčové procesy magnetického přepojování mohou probíhat nejen pod strukturou procházející erupcí, ale i přímo uvnitř ní. Díky unikátní kombinaci rádiových, extrémně ultrafialových a rentgenových pozorování autoři detailně rekonstruují počáteční fázi erupce z 2. dubna 2022 a odhalují nové souvislosti mezi strukturou magnetického pole, urychlováním částic a vznikem záření.

Slunce je proměnná hvězda, jejíž aktivita se projevuje mimo jiné slunečními erupcemi a výrony koronální hmoty. Tyto jevy jsou důsledkem náhlého uvolnění energie akumulované v magnetickém poli ve sluneční atmosféře. Klíčovým fyzikálním mechanismem, který umožňuje tuto přeměnu energie, je magnetická rekonexe – proces, při němž se magnetické siločáry přepojují do konfigurace s menším množstvím energie. Přitom se uvolněná magnetická energie mění na teplo, pohyb plazmatu a energii urychlených částic, což se mimo jiné projeví emisí záření od rádiových vln až po tvrdé rentgenové a gama záření.

V současném standardním modelu erupcí hraje zásadní roli tzv. magnetický tokový provazec, tedy svazek zkroucených magnetických siločar, který se stává nestabilním a začne stoupat do koróny. Pod ním se vytváří tenká proudová vrstva, kde dochází k intenzivnímu magnetickému přepojování, vzniku jasných erupčních smyček a urychlování částic. Mnoho pozorování i numerických simulací tento scénář potvrzuje. Přesto však zůstává otevřenou otázkou, zda a za jakých podmínek může k významnému přepojování docházet také uvnitř samotného provazce nebo v jeho bezprostřední interakci s okolními magnetickými strukturami.

Nejen na tuto otázku se zaměřuje studie, která využívá mimořádně bohatý soubor pozorování jedné eruptivní události z 2. dubna 2022. Šlo o erupci M3.9 spojenou s vyvržením rozsáhlého filamentu, tedy relativně chladného a hustého plazmatu zavěšeného v magnetickém poli nad povrchem Slunce. Právě tento filament představoval viditelnou část magnetického tokového provazce.

Základním přístupem práce je detailní časová a prostorová korelace pozorování v různých oborech elektromagnetického spektra. V rádiové oblasti autoři využili čtyři pozemní radiospektrografy pokrývající široký frekvenční rozsah od desítek megahertz až po několik gigahertzů. To jim umožnilo studovat pestrou škálu rádiových záblesků, které jsou indikátorem pohybu urychlených elektronů v magnetickém poli Slunce. V extrémním ultrafialovém oboru analyzovali obrazová data z družic SDO, Solar Orbiter a STEREO-A, které poskytly pohled na erupci z různých směrů a pomohly pochopit trojrozměrnou geometrii erupčních struktur. Rentgenová data pocházela především z přístroje STIX na palubě Solar Orbiter, který poskytl nejen spektra, ale i obrazy zdrojů rentgenového záření.

Pomocí fitování spekter dokázali odlišit, kdy je rentgenové záření produkováno převážně horkým plazmatem, a kdy už je nutné uvažovat i přítomnost netepelných elektronů urychlených na vysoké energie.

Zajímavé je, že v okolí filamentu existovaly ještě před jeho prudkým vzestupem horké koronální

smyčky. Tyto smyčky byly pozorovány v extrémním ultrafialovém oboru i v měkkém rentgenovém záření a svědčily o tom, že v oblasti již probíhal ohřev plazmatu. Jakmile se filament začal zvedat, dostal se do přímé interakce s těmito smyčkami. Autoři tuto situaci interpretují jako tzv. přepojování typu „arkáda–provazec“, kdy se magnetické siločáry okolní arkády přepojují se siločarami zvedajícího se tokového provazce.

Po interakci filamentu s horkými smyčkami, se ve filamentu objevily výrazné ultrafialové struktury spirálovitého či kruhového vzhledu. Tyto struktury svědčí o tom, že magnetické pole uvnitř provazce není jednoduché, ale silně zkroucené. Jejich přítomnost byla časově dobře svázána s výskytem neobvyklých rádiových záblesků v gigahertzovém oboru, které jsou interpretovány jako důsledek pohybu elektronových svazků po šroubovicových drahách uvnitř magnetického provazce. Díky tomu, že se elektrony pohybují po dlouhé a zakřivené trajektorii, je změna frekvence rádiového signálu v čase pomalejší než u běžných rádiových záblesků, které jsou způsobeny pohybem elektronových svazků ve vertikálním směru.

Autorům se také podařilo nalézt v rentgenovém a rádiovém záření indicie i pro magnetické přepojování probíhající pravděpodobně uvnitř tokového provazce, nikoli pouze pod ním. Autoři navrhují, že za určitých okolností může být proudová hustota uvnitř provazce lokálně dostatečně vysoká, aby umožnila přepojování a urychlování částic. To je nad rámec tradiční představy, podle níž je uvnitř provazce kvůli jeho velkému průřezu proudová hustota příliš nízká. Avšak pozorované charakteristiky naznačují, že v strukturovaném a nestabilním provazci mohou existovat oblasti, kde k přepojování dochází.

Celkově studie ukazuje, že sluneční erupce mohou zahrnovat pestré a prostorově rozmanité procesy magnetického přepojování. Díky kombinaci detailních rádiových spekter, ultrafialových snímků pořízených z různých směrů a pokročilé analýzy rentgenových dat se autorům podařilo propojit jednotlivé signatury do uceleného fyzikálního obrazu. Výsledkem jsou přesvědčivé argumenty, že interakce nestabilního magnetického provazce s okolními strukturami i přepojování probíhající přímo uvnitř něj hrají významnou roli při zahřívání plazmatu a urychlování částic na Slunci.

J. Kašparová, J. Dudík, M. Karlický, A. Zemanová a kol., *Radio, X-ray, and EUV signatures of internal and external reconnection of an erupting flux rope*, Astronomy & Astrophysics v tisku, preprint arXiv:2512.02594

https://www.asu.cas.cz/articles/2514/19/na-cem-pracujeme-kdyz-se-magneticke-silocary-trhaji-zevnitr-novy-pohled-do-nitra-slunecni-erupce