

Na čem pracujeme: Selhání erupce filamentu v magnetohydrodynamické simulaci

29.4.2026 - Michal Švanda | Astronomický ústav AV ČR

Erupce slunečních filamentů jsou považovány za základ výronů hmoty do koróny, známých CME, které mohou ovlivňovat i kosmické počasí v okolí Země. Tyto erupce však ne vždy skončí úspěšným výronem hmoty do meziplanetárního prostoru. Nová studie ukazuje, že za „neúspěšnými erupcemi“ filamentů stojí jemná rovnováha mezi magnetickými silami a gravitací - a že jejich následné kmitání může být klíčem k pochopení dynamiky sluneční koróny.

Slunce je dynamická hvězda, jejíž atmosféra - koróna - je prostoupena složitými magnetickými poli. Jedním z nejvýraznějších projevů této magnetické aktivity jsou sluneční filamenty. Jde o relativně chladná a hustá vlákna plazmatu zavěšená v horké koróně. Pokud je pozorujeme nad okrajem disku, označujeme je jako protuberance, proti disku Slunce se nám zdají tmavší a mluvíme o filamentech. Tato struktura je stabilizována magnetickými silami, které vyvažují gravitační působení Slunce. Filamenty však nejsou statické: mohou se destabilizovat a být vyvrženy do prostoru, často v souvislosti s koronálními výrony hmoty (CME), které mají zásadní dopad na kosmické počasí a technologickou infrastrukturu na Zemi.

Pozorování ale ukazují, že ne každá destabilizace vede k úspěšnému úniku materiálu. V mnoha případech dochází k tzv. „neúspěšným erupcím“, kdy filament sice začne stoupat, ale následně se zastaví a opět spadne zpět ke Slunci. Tyto jevy jsou doprovázeny oscilacemi a složitou dynamikou, jejichž fyzikální podstata není zcela jasná. Pochopení těchto procesů je jedním z klíčových problémů pro praktické předpovědi sluneční aktivity.

Marian Karlický z ASU se společně s kolegy z Jihočeské univerzity zaměřili právě na tuto problematiku a snažili se vysvětlit, co se děje po destabilizaci filamentů, které nakonec neuniknou do prostoru. Autoři kombinují analytický přístup s numerickými simulacemi, aby identifikovali klíčové mechanismy vedoucí k zastavení erupce a následným oscilacím.

Samotná studie vychází z idealizovaného, ale fyzikálně motivovaného modelu filamentů. Autoři navazují na klasický model, v němž je filament reprezentován jako proudem nesené vlákno (tedy vodič s elektrickým proudem), které je v rovnováze díky odpudivé magnetické interakci s „obrazovým proudem“ pod fotosférou, přes který se smyčka filamentu uzavírá. Tato magnetická síla působí proti gravitaci, která filament táhne dolů. V rovnovážném stavu se tyto síly přesně vyvažují. Tato studie je první, ve které je destabilizace filamentu řešena se zahrnutím jeho váhy (gravitační síly).

Prvním krokem je analytická analýza tohoto systému. Autoři studují stabilitu rovnováhy a ukazují, že systém lze destabilizovat dvěma základními způsoby: buď zvýšením elektrického proudu ve filamentu, nebo snížením hustoty plynu ve filamentu (a tedy hmotnosti). Oba mechanismy vedou ke ztrátě rovnováhy a počátečnímu vzestupu filamentární struktury.

Na tento analytický základ navazuje numerická část práce. Autoři používají dvourozměrný magnetohydrodynamický (MHD) model, ve kterém řeší rovnice popisující chování plazmatu a magnetického pole. Simulace sledují dynamiku filamentu v čase, včetně výšky, rychlosti, proudových struktur a rekonexe magnetického pole.

Výsledky simulací ukazují překvapivě konzistentní scénář. Po destabilizaci filament začne stoupat

vzhůru, ale místo toho, aby unikl do meziplanetárního prostoru, se jeho pohyb zastaví v určité výšce. Následně filament začne klesat zpět a celý proces se opakuje ve formě tlumených oscilací. Perioda těchto oscilací je řádově stovky sekund (v simulacích přibližně 600 s).

Důležitým výsledkem je identifikace mechanismu, který zastavuje erupci. Pod stoupajícím filamentem se vytváří proudová vrstva, kde dochází k magnetické rekonexi. Tento proces vede k akumulaci plazmatu pod filamentem, což vytváří dodatečnou podporu proti gravitaci. Jinými slovy, systém spěje k novému rovnovážnému stavu. Simulace také ukazují, že maximální dosažená výška filamentů závisí na parametrech destabilizace. Vyšší elektrický proud nebo nižší hustota látky vedou k větším amplitudám výstupu, což lze popsat přibližně exponenciální závislostí. To znamená, že i relativně malé změny fyzikálních podmínek mohou výrazně ovlivnit průběh erupce.

Roli hraje i magnetické ukotvení filamentů v hustších vrstvách sluneční atmosféry. Pokud je filament „hlouběji zakořeněn“, vzniká silnější a výraznější proudová vrstva, což podporuje efektivnější rekonexi. Ta pak zásadně ovlivňuje dynamiku systému a přispívá k zastavení erupce.

Autoři nezastírají, že jde o zjednodušený model, který používá zjednodušené počáteční podmínky. Rovnováha je například narušena náhle, zatímco ve skutečnosti by takové procesy probíhaly postupně. Simulace však naznačují, že vliv charakteru počátečních podmínek je zřejmě nepodstatný. I v realističtějších scénářích by výsledné chování mohlo být podobné, zejména pokud je systém omezen nadložním magnetickým polem, které by postupnou změnu počátečních podmínek téměř převedlo na náhlou změnu v okamžiku, kdy by blokace nadložním polem byla překonána.

Podstatné je, že popisovaný scénář – počáteční vzestup, zastavení, návrat a oscilace – odpovídá tomu, co astronomové skutečně pozorují u neúspěšných erupcí filamentů. Studie tak poskytuje fyzikální vysvětlení těchto jevů a propojuje je s konkrétními mechanismy, jako je magnetická rekonexie a změny proudů či hustoty. Článek tak přináší důležitý příspěvek k pochopení dynamiky slunečních filamentů. Kombinace analytického modelu a numerických MHD simulací umožňuje nejen vysvětlit, proč některé erupce selhávají, ale také kvantifikovat vliv klíčových parametrů. Rozhodující roli hraje interakce mezi magnetickými silami a plazmatickými procesy. I malé změny v těchto parametrech mohou vést k výrazně odlišným výsledkům. Což odpovídá obtížně předpověditelnému chování skutečných filamentů, které na Slunci pozorujeme.

P. Jelínek, M. Karlický, S. Belov, *Failed ejection and oscillations of a current-carrying filament balanced by gravity*, *Astronomy & Astrophysics* 707 (2026), id.A82, preprint arXiv:2601.15823

<https://www.asu.cas.cz/articles/2550/19/na-cem-pracujeme-selhani-erupce-filamentu-v-magnetohydrodynamicke-simulaci>