

Na čem pracujeme: Sluneční energetické částice v numerickém modelu

29.11.2023 - | Astronomický ústav AV ČR

Netermální urychlování částic je široce rozšířeným jevem ve vesmíru, najdeme jej v magnetosférách planet i v kupách galaxií. Bezprostřední okolí Země není výjimkou, polární záře jsou výsledkem interakce molekul vzduchu s nabitými částicemi od Slunce, které byly nějakou dobu urychlovány v zemské magnetosféře. A stejné procesy nastávají na Slunci. Zde jsou výrony částic nejčastěji spojovány se slunečními erupcemi a v této souvislosti nejčastěji mluvíme o slunečních energetických částicích (solar energetic particles, SEP). Sledování SEP a pochopení jejich vzniku je důležité pro hodnocení některých technologických hrozeb vyvolaných sluneční aktivitou. SEP významně zvyšují radiální dávky ovlivňující činnost přístrojů na družicích v blízkosti Země a také potenciálně ovlivňující zdraví kosmonautů i posádek letadel.

Z pozorování je známo, že v okolí Země je mezi SEP zastoupeno výrazně vyšší množství těžších iontů nesoucích vysoké energie. Ionty skupiny neonu až železa jsou častější až desetkrát, ultratěžké i více než stokrát oproti stavu v koróně. Také zastoupení izotopu helia-3 je vyšší, než by se očekávalo z jednoduché aplikace fyzikálních zákonů, tento ion je častější dokonce až desettisíckrát. Je zřejmé, že nějaký proces musí preferenčně urychlovat ionty s malou hodnotou poměru náboje a hmotnosti. V literatuře se již v minulosti objevily myšlenky, že by mohlo jít o procesy související s rezonančním urychlením prostřednictvím plazmových vln, ale výsledky těchto studií nebyly příliš přesvědčivé.

Autoři představovaných studií proto přišli s jiným nápadem. Již z dřívějších prací, na kterých se naši vědci také podíleli, je známo, že přepojení magnetického pole - rekonexe - která je základním procesem při slunečních erupcích, neprobíhá v poklidu a rovnoměrně v celé oblasti. Místo toho se vrstva nesoucí elektrický proud v turbulentní kaskádě (fraktálně) štěpí do magnetických ostrovů podobně jako při „tradiční“ turbulenci např. v peřejích řeky se tok vody drobí do postupně stále menších vírů. Turbulentní kaskáda směrem k menším strukturám končí tzv. disipační škálou - na ní už se projevuje efektivní elektrický odpor a menší magnetické ostrovy (nebo víry v případě klasické turbulence), než tato škála, v ní už nenajdeme. Jak to může souviset s výše zmíněným výběrovým efektem podporujícím urychlení těžších částic? Nabité částice - elektrony i ionty - se v magnetickém poli pohybují po spirálách (přesněji šroubovicích) kolem magnetických siločar. Typický poloměr jejich zakřivené dráhy - při jinak stejných parametrech (teplotě a magnetickém poli) - závisí na poměru náboj/hmotnost: čím těžší částice, tím větší oblast prostoru na své orbitě navštíví. Co když - uvažovali autoři studie - mají těžší částice typický poloměr své dráhy větší, než jsou rozměry těch nejmenších (a ve spektru turbulence nejčastějších) magnetických ostrovů? Pak by mohly putovat z ostrova do ostrova a získávat jejich energii mechanismem, který pro urychlování částic na mnohem větších extra-galaktických škálách navrhl už Enrico Fermi. Naopak, lehčí částice zůstávají po většinu času uvězněny uvnitř jednoho ostrova a tento proces pro ně není účinný.

Jednou z možností, jak tuto ideu blíže prozkoumat, je s pomocí numerických simulací slunečního plazmatu. Ty ovšem naráží na klíčový problém velkého rozsahu vzájemně provázaných škál - zatímco rozměr celé erupce se měří ve statisících kilometrech, ty nejmenší magnetické ostrovy mohou mít jen stovky metrů a proudová vrstva mezi nimi je ještě o řád tenčí. Ani ty nejlepší superpočítače světa nejsou schopny pojmout tak rozsáhlou simulaci. Vědci se proto často uchylují ke schůdnému kompromisu: Velko-rozměrovou dynamiku simulují se započítáním pouze kolektivního chování všech částic plazmatu, berou ho jako jednolitou vodivou tekutinu. V tomto (tzv. magnetohydrodynamickém - MHD) modelu se informace o individuálních částicích jakož i o procesech na velmi malých škálách

zcela ztrácí, ovšem je možné studovat dění ve strukturách s rozměry srovnatelnými se skutečnými rozměry struktur ve sluneční atmosféře. Model procesů na simulaci nerozlišených škálách lze do jisté míry nahradit zjednodušeným matematickým předpisem pro efektivní elektrický odpor, který se zvýší, když tloušťka proudové vrstvy poklesne pod určitou mez. Ale co s těmi individuálními ionty? Velkorozměrový MHD model nám poskytne kromě hustoty, teploty a rychlosti plazmatu i detailní mapu elektrických a magnetických polí spolu s jejím časovým vývojem. Do těchto polí je možno chytře (abychom se vyhnuli statistickým výběrovým efektům) vložit jednotlivé částice – různé těžké ionty – a studovat jejich pohyb a urychlování. A přesně tento přístup použil tým vědců, jehož součástí byl i Miroslav Bárta ze Slunečního oddělení ASU.

Autoři nejprve vypočetli model spontánně fragmentující rekonexe v proudové vrstvě, situované do atmosféry podobné sluneční koróně. Šlo o tzv. dvaapůl-rozměrný model, což znamená, že model je hodnocen v plošné geometrii, ovšem vektorové veličiny jsou počítány trojrozměrně. Jde o přijatelný kompromis mezi výpočetní náročností a realistickou geometrií. Hodnocená doména zachycovala 43 Mm v horizontálním směru a 172 Mm ve směru vertikálním, v němž také probíhala gravitační stratifikace atmosféry. Celá simulace zachycovala asi pět minut vývoje v reálném čase, pro účely cíle práce byla ale studována mnohem kratší perioda ke konci simulace.

MHD model byl pak využit jako pozadový pro studium chování jednotlivých částic, jejichž trajektorie byly v simulaci numericky integrovány. Autoři v tomto případě „rozeseli“ v pozadí pět milionů testovacích částic a výsledky vyhodnocovali statisticky.

Z hodnocení vyplývá, že skutečně dochází k preferenční energizaci těžších iontů. Je zde zřejmá závislost, kdy ionty s malým poměrem náboje ku hmotnosti získávají významně více kinetické energie ve srovnání s ionty lehčími a to i v poměru na jeden nukleon. Autoři „rozebrali“ mechanismy urychlení pomocí z fyziky plazmatu známé formule pro časovou změnu energie částice pohybující se v dynamickém elektromagnetickém poli a skutečně identifikovali Fermiho mechanismus „nakopávání“ částic jednotlivými magnetickými ostrovy v proudové vrstvě jako dominantní.

Přebytek těžkých energických částic od Slunce pozorovaný v těsném okolí Země tak lze vysvětlit původem tohoto stavu již během sluneční erupce. Autoři však přiznávají, že škálovací zákony odvozené ze simulace nesouhlasí s tím, co se u Země měří. Diskutují, že existuje celá řada důvodů, proč by tomu tak mohlo být. Například model rekonexe nemusí přesně reprezentovat skutečnou fragmentaci ve sluneční erupci – zejména sub-gridový model pro efektivní odpor, který určuje zlom kaskády na disipační škále, je poměrně slabým článkem kompromisního MHD přístupu. Navíc je třeba zohlednit, že od místa rekonexe musí částice k Zemi urazit celou jednu astronomickou jednotku, což jim trvá několik desítek hodin. Rychlostní rozdělení částic se během této cesty přirozeně mění, např. jak oblak částic v průběhu letu expanduje a podléhá turbulenci. Tyto transportní jevy tedy přirozeně mění energetické spektrum SEP a přímé srovnání pozorování u Země se simulací odpovídající místu na Slunci není možné.

Na tuto práci proto navázala i letošní studie, ve které se v částečně obměněném složení autorského týmu vědci snaží vylepšit zejména model rekonexní kaskády v oblasti disipační škály. Za tímto účelem využili tzv. hybridní model, který zahrnuje plnou částicovou dynamiku iontů a kolektivně jako tekutinu uvažuje jen na mnohem kratší časové škále se pohybující elektrony. Tento přístup bohužel neumožní sledovat vývoj v celé erupční oblasti a na dostatečně dlouhé časové škále – na to výpočetní síla našich současných superpočítačů nestačí. Ale z druhé strany poskytuje jakoby zvětšený vhled do jádra rekonexe na jejích menších škálách a přirozeně simuluje zlom (ve skutečnosti několik zlomů, jak do hry postupně vstupují jednotlivé procesy spojené s částicovým charakterem plazmatu) turbulentní kaskády v oblasti před dosažením disipační škály. Předběžné výsledky ukazují, že částicový výpočet vede k lepší shodě energetických spekter s pozorováními a že výše zmíněné transportní jevy jsou zřejmě hlavním důvodem zbývajících neshod.

D. Kramoliš, M. Bárta, M. Varady a R. Bučík, *Preferential Acceleration of Heavy Ions in a Spontaneously Fragmenting Flare Current Sheet*, Astrophysical Journal 927 (2022) id art. 177.

N. Jain, J. Büchner, M. Bárta, R. Bučík, *Preferential acceleration of heavy ions in magnetic reconnection: Hybrid-kinetic simulation with electron inertia*, v přípravě, preprint arXiv:2307.13268.

<https://www.asu.cas.cz/articles/2199/19/na-cem-pracujeme-slunecni-energeticke-castice-v-numericke-m-modelu>