

Na čem pracujeme: Jak vzniká penumbra slunečních skvrn?

28.5.2024 - | Astronomický ústav AV ČR

Ukázala to již první teleskopická pozorování slunečního kotouče na počátku 17. století, že velké sluneční skvrny jsou tvořeny dvěma rozdílnými částmi. Jednak tmavou umbrou uvnitř, která je lemována mnohem světlejší penumbrou.

Větší přístroje a dobré pozorovací podmínky dovolily ukázat, že penumbra není celistvě šedá, ale je tvořena téměř radiálními vlákny – penumbrálními filamenti. Ještě dokonalejší přístroje z moderní doby pak ukázaly, že i tato vlákna mají vnitřní strukturu a že určité útvary nalezneme i v samotné umbře. Spektroskopická měření pak prokázala, že sluneční skvrny jsou oblastmi se silným magnetickým polem. Zatímco umbra je charakteristická polem, které je téměř vertikální vůči rovině fotosféry, tak v penumbře se pole k okolní fotosféře sklání. Magnetické pole ve skvrně potlačuje konvekci, tedy mechanismus přenášející teplo z nitra Slunce, skvrna je proto chladnější a tedy temnější ve srovnání s nemagnetickým okolím.

Mnoho studií v minulosti se věnovalo tomu, jaká fyzikální veličina rozhodne, zda se v daném místě vytvoří umbra nebo penumbra. Zpočátku se zdál být klíčovou veličinou sklon magnetického pole, pak jeho celková indukce a posledním hitem určující hodnota vertikální složky vektoru magnetické intenzity. Skutečně se zdá, že je to právě hodnota vertikální komponenty, zda v daném místě bude stabilně přítomna umbra nebo penumbra. Jenže takové diskriminační kritérium neodpovídá na otázku, proč se penumbra vytvoří a co tomu předchází.

Odpovědi na tyto otázky hledala Marta García-Rivas, doktorandka Jana Jurčáka z ASU. Pro svůj výzkum využila pozorování sluneční skvrny NOAA 11024 získaná s použitím Fabryho-Pérotova interferometru GFPI, který je napájen německým dalekohledem VTT na Tenerife. Záznamy pocházejí z 9. července 2009 a sledovaly vývoj sluneční skvrny během 4 hodin a 40 minut. Analýza se zaměřila na dvouhodinový interval nepřetržitého pozorování od 08:32 do 10:32 světového času, během kterého bylo provedeno 109 skenů. Pozorování zahrnovala snímkování v pásmu G v modré oblasti spektra a plně polarimetrická data ve spektrální čáře neutrálního železa s vlnovou délkou 617,3 nm. Tyto datové sady již byly použity v předchozích studiích a poskytují podrobný pohled na magnetické pole a průmět rychlostního pole ve směru k pozorovateli, tyto fyzikální údaje byly získány prostřednictvím spektropolarimetrické inverze.

Autoři si cíleně vybrali skvrnu, která byla na počátku pozorování bez penumbry, a v průběhu času se u ní penumbra částečně vyvinula. Přirozeně se soustředili na studium výseku, v němž bylo možné vznik penumbry sledovat tak říkajíc „v přímém přenosu“. Takové výseky si autoři vybrali hned tři. V prvním z nich se několik desítek minut před objevením penumbry objevilo dvousměrné proudění jakoby se roztékající v radiálním směru v místě, kde je na snímku v pásu G pozorovatelná jasná struktura připomínající protaženou granuli. Roztékavá oblast silně připomíná situaci, která je běžná při vynořování nových magnetických polí do fotosféry. Tato proudová struktura se v průběhu času vzdalovala od skvrny a to proto, že směrem od umbry skvrny se začala rozšiřovat oblast proudění ve směru od skvrny. Toto proudění je považováno za první známku tzv. Evershedova proudění, které je běžné podél filamentů v penumbrách slunečních skvrn. V sekvenci snímků je patrná celá řada světlých objektů pohybujících se od skvrny, které připomínají vzhledem penumbrální zrna, opět známá z vyvinutých penumber skvrn. V místě se posléze zformoval běžný penumbrální filament.

V jiném segmentu skvrny se vytvořil přechodný penumbrální filament, v němž proudění hmoty

probíhalo opačným způsobem, tedy směrem do skvrny. Filament se vytvořil během pouhých 10 minut a za dalších čtvrt hodinu po něm nebyly ani památky. Po jakési přestávce se do oblasti ze skvrny rozrostl již klasický penumbrální filament s Evershedovým tokem ve správném směru.

Do třetice v ještě jiném segmentu se nejprve objevila anomálně vyhlížející granulace. Vykazovala menší buňky než v oblasti klidného Slunce, přesto s intenzitou odpovídající běžným granulím. Jejich pohyby ovšem nebyly náhodné, jak je zvykem v oblasti bez magnetického pole, ale vytvářely jakousi filamentární strukturu. Také jejich životnost byla delší než je u běžných granulí normální.

Autoři poukázali tedy přinejmenším na tři anomální scénáře, které předcházejí vytvoření penumbry. Není pochyb o tom, že všechny tři mají svoji souvislost s interakcí konvekce a magnetického pole. Ve všech třech případech se objevily protažené struktury a útvary, které naznačovaly směr budoucích penumbrálních filamentů.

Práce možná nedává jednoznačnou odpověď na to, co přesně předchází vzniku penumbry. Přesvědčivě ale ukazuje, že penumbra skvrn se rozšiřuje od umbry a nevzniká například přeměnou degenerované granule v místě, jak naznačovaly některé jiné studie. Prvním jasným indikátorem vývoje penumbry je Evershedův tok, který se objeví na okraji umbry. Hodnota vertikální komponenty magnetické indukce je zde menší než je kritická, takže rozhraní není stabilní. Odpovídající penumbrální filament se poměrně rychle roztáhne do větších vzdáleností od hranice, někdy se může jeho hlava dokonce zanořit do umbry skvrny. Skvrna každopádně zvětšuje svoji velikost. Magnetické pole postupně získá svoji konfiguraci typickou pro stabilní penumbru: pole s indukcí asi 2500 G a sklonem asi 30 stupňů vůči vertikále na vnitřní hraně a pole s indukcí asi 600 G a sklonem asi 70 stupňů na vnější hranici.

Výsledky ukazují, že formace penumbry začíná v oblastech s určitými specifickými vlastnostmi magnetického pole a rychlostí. Během procesu formace se magnetické pole zintenzivňuje a dochází k uspořádání v charakteristické filamenty, které jsou typické pro penumbru. Důležitou roli hraje Evershedův tok, radiální tok plazmatu z centra sluneční skvrny směrem ven. Studie ovšem konečnou odpověď nepřinesla. K tomu je zapotřebí dalších pozorování a především realistických numerických simulací.

M. García-Rivas, J. Jurčák a kol., *Onset of penumbra formation*, Astronomy & Astrophysics v tisku, preprint arXiv:2403.18455

<https://www.asu.cas.cz/articles/2275/19/na-cem-pracujeme-jak-vznika-penumbra-slunecnich-skvrn>