

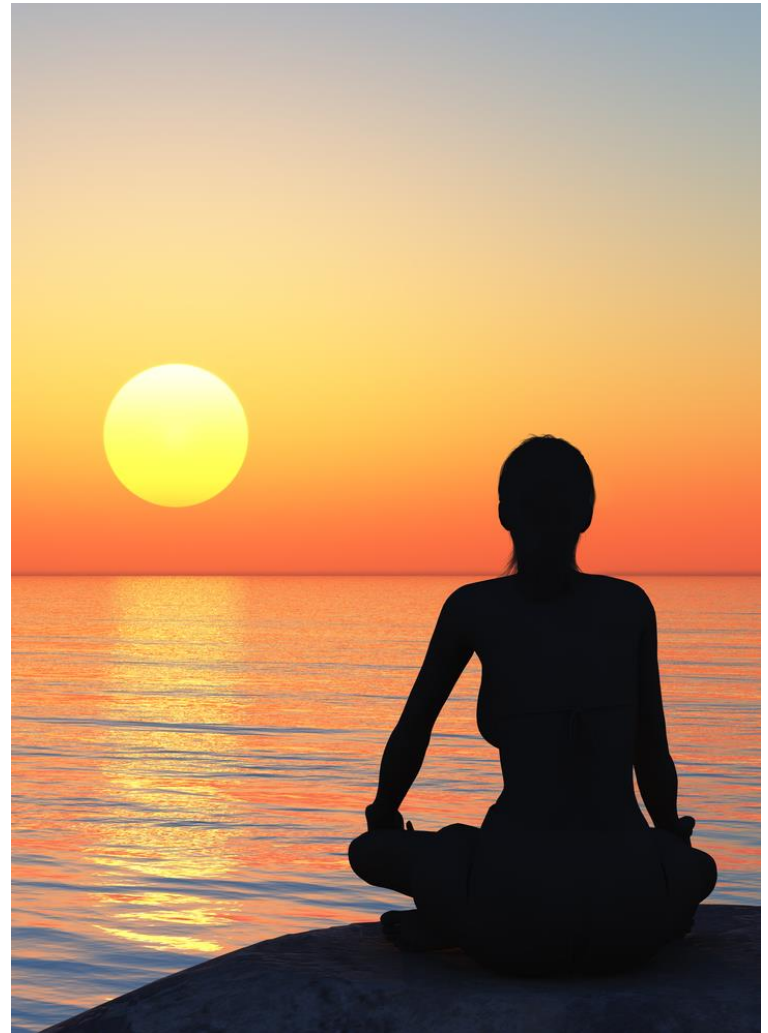
Co nového o Slunci zjistila Parkerova sluneční sonda?

Michal Švanda

Astronomický ústav UK
Astronomický ústav AV ČR

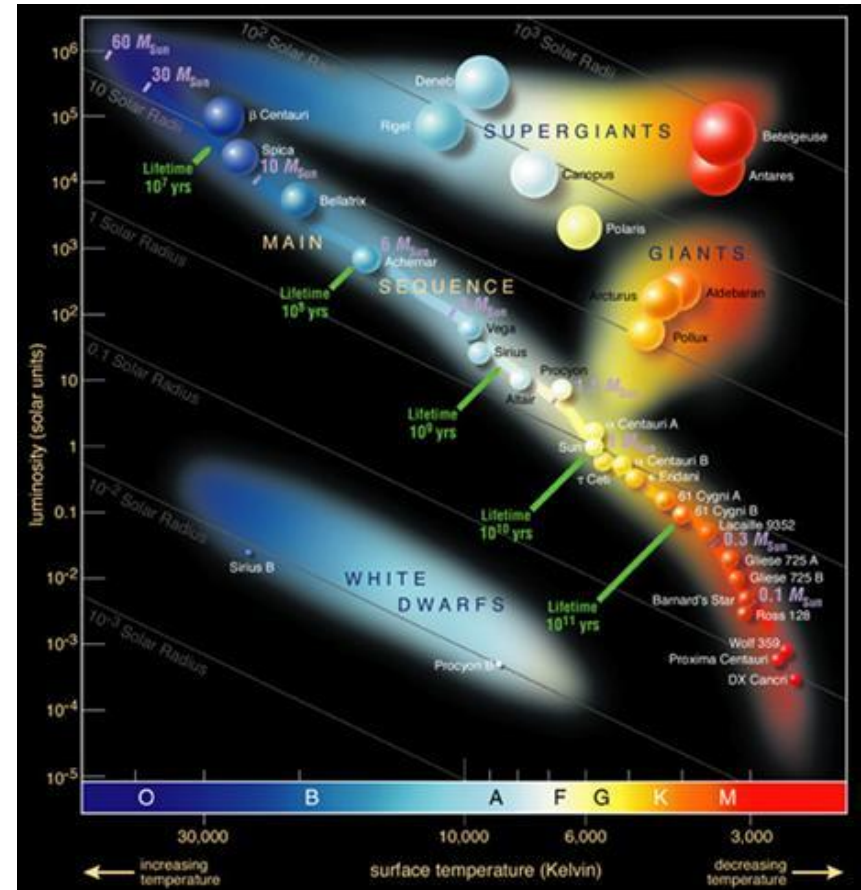
Cože? Slunce? Proč?

- Slunce je astrofyzikálně nesmírně zajímavý objekt
- Prototyp hvězdy
- Je blízko
- (Nepříliš) vzdálená laboratoř fyziky plazmatu
- Je magneticky aktivní a ovlivňuje nás víc, než si myslíme

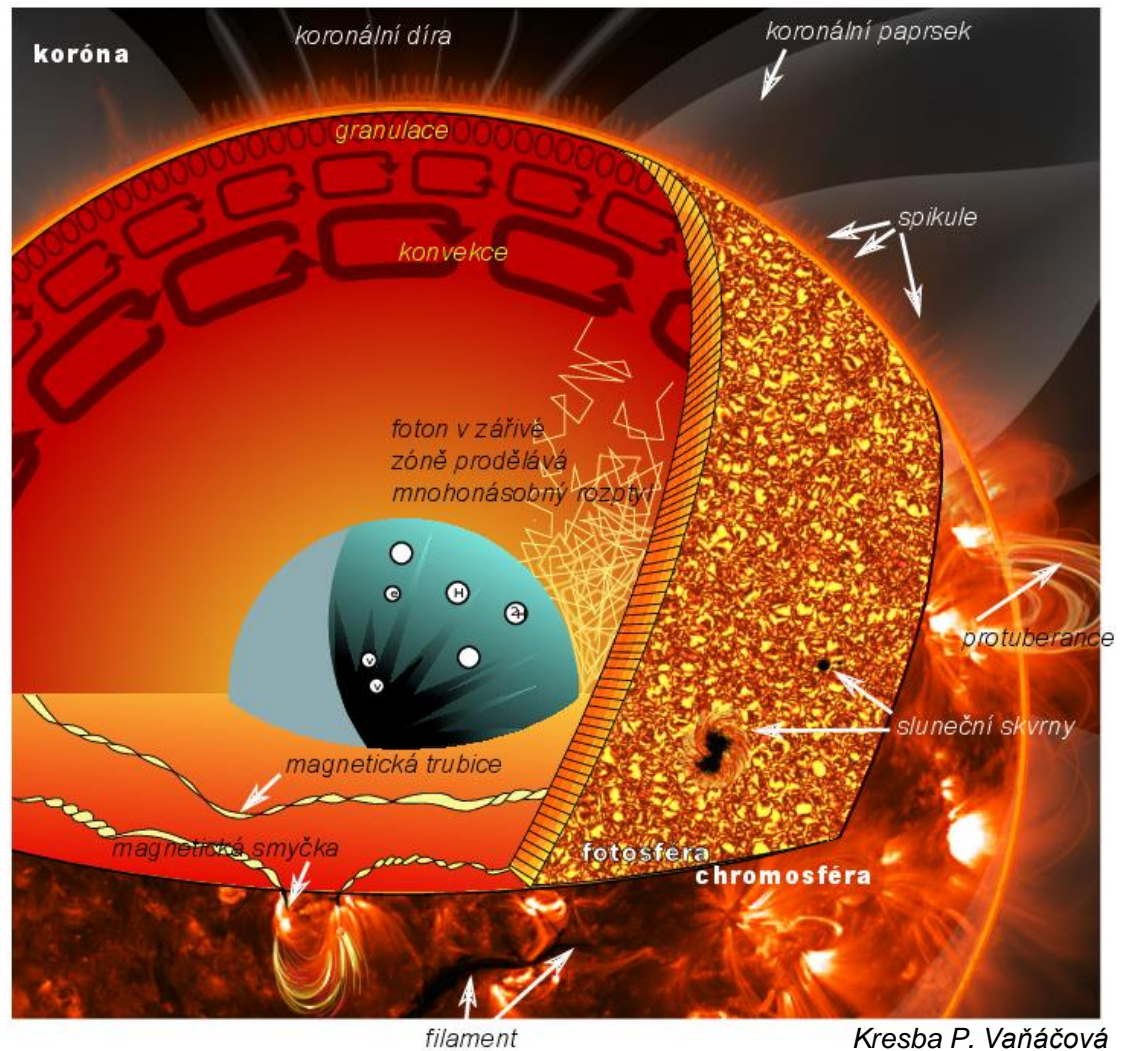
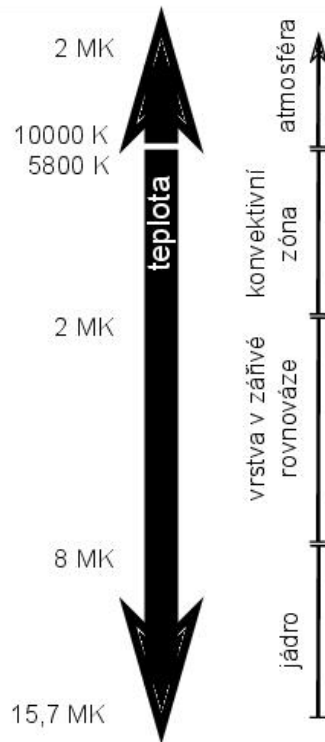


Slunce jako hvězda: holá fakta

- ❑ Spektrální třída G2, hlavní posloupnost
- ❑ 4,5 mld let, v „nejlepších letech“
- ❑ $M=1,98 \times 10^{30}$ kg
- ❑ $R=695\,980$ km
- ❑ $L=3,84 \times 10^{26}$ W
- ❑ $Z=0,018$ (?)
- ❑ $T_{\text{eff}}=5770$ K

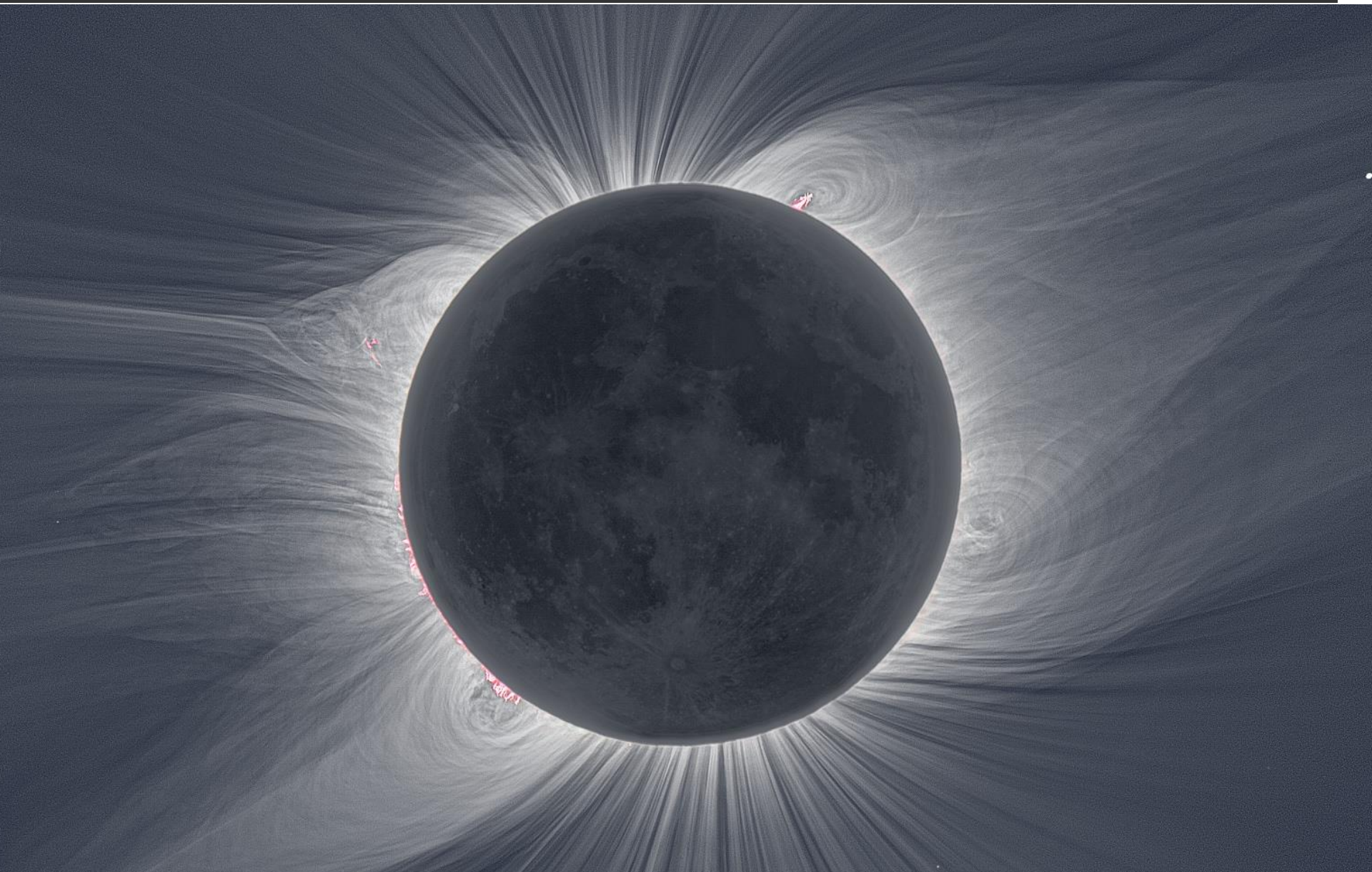


Slunce: naše nejbližší hvězda

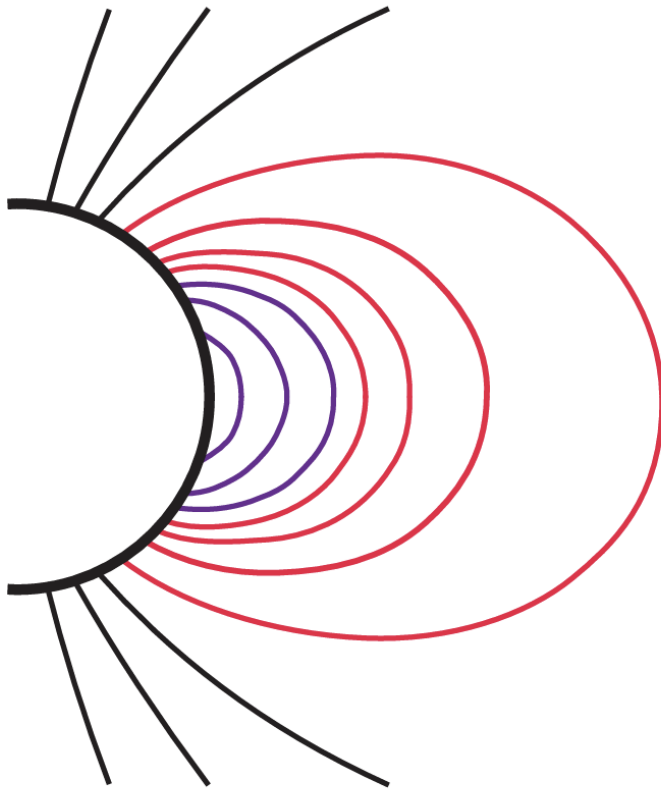


Kresba P. Vaňáčová

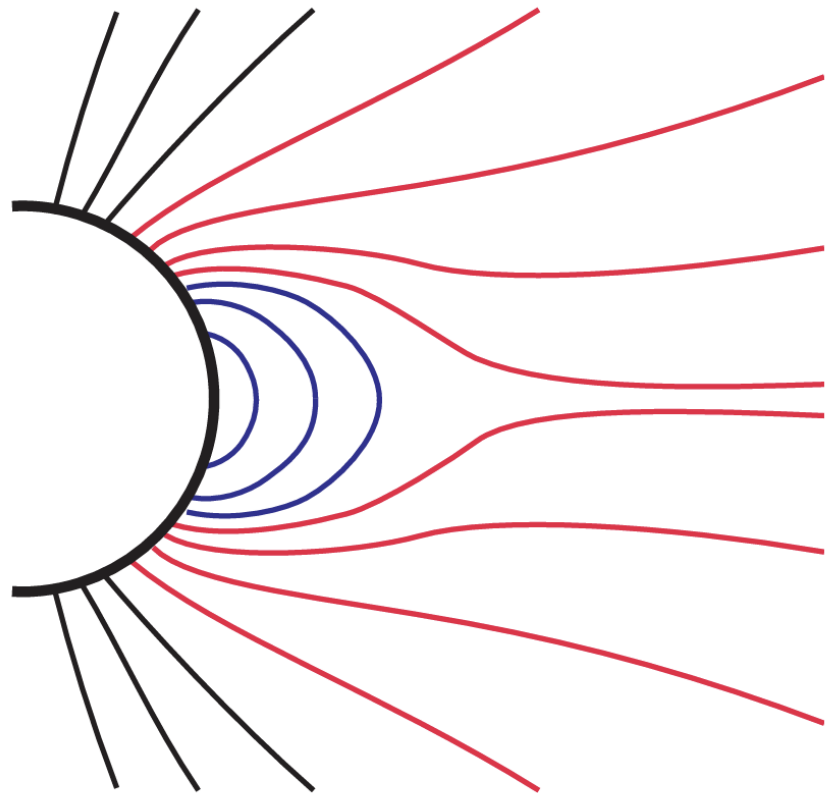
Koróna



Koróna + sluneční vítr provázané

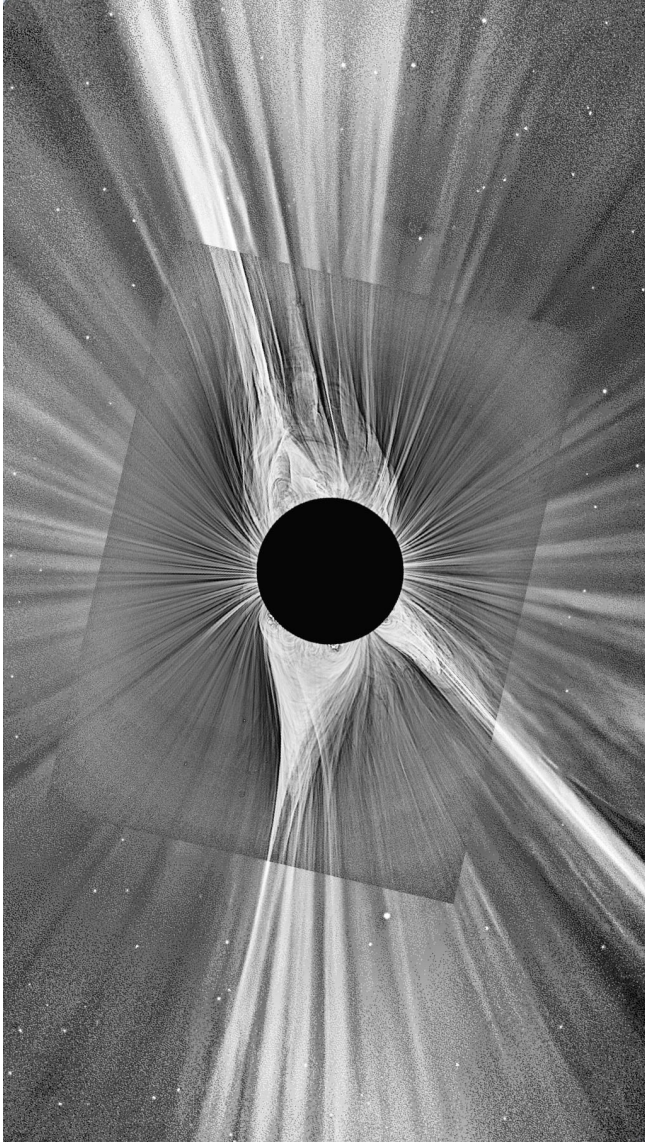


Magnetické pole bez větru



Magnetické pole s větrem

Otevřené otázky přetrvávají

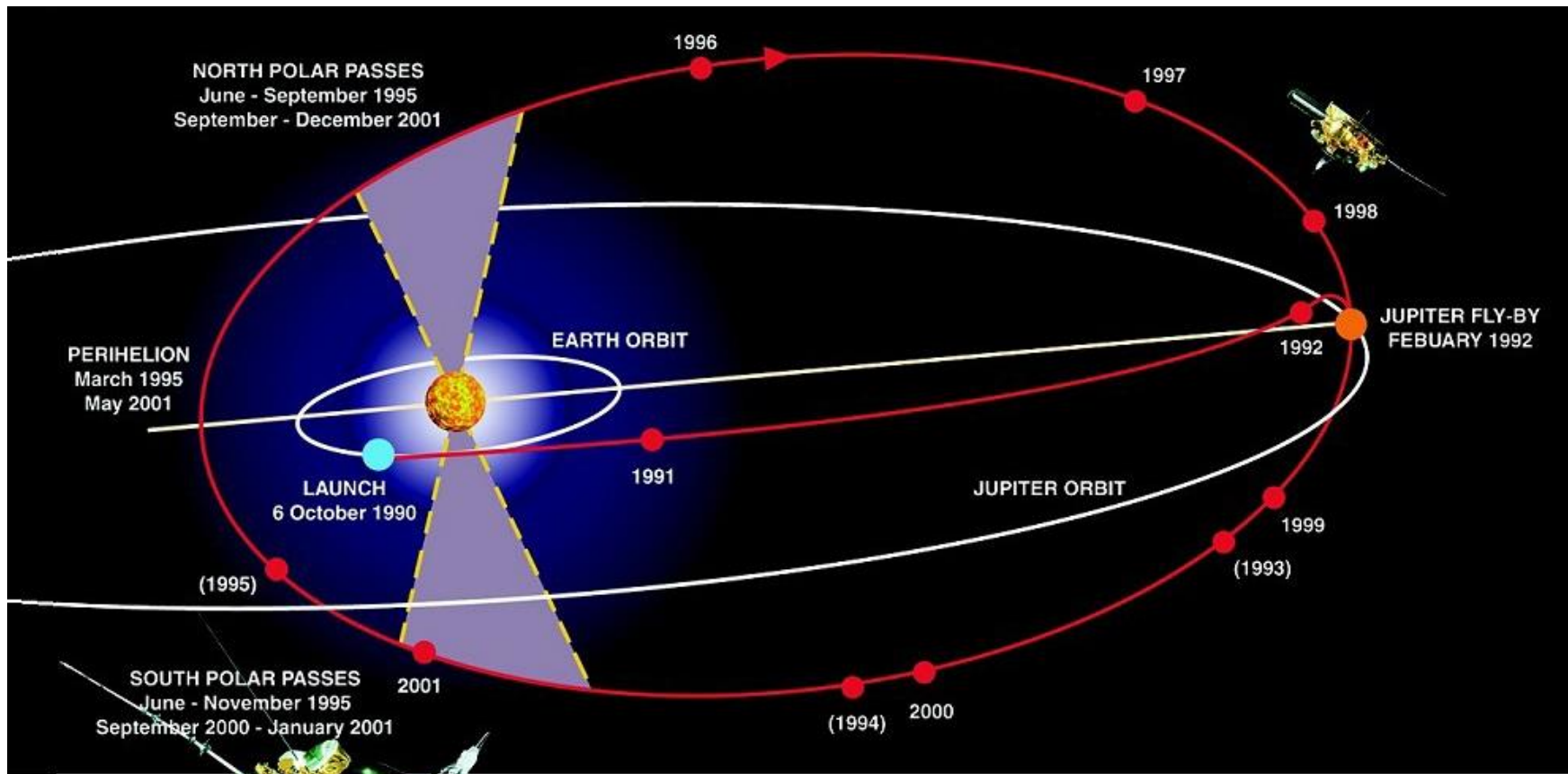


- Proč je koróna horká
 - Více než 20 možných hypotéz, dvě konkurující si skupiny modelů
- Proč je sluneční vítr tak rychlý
 - Pomalý sluneční vítr odpovídá Parkerovu modelu
 - Rychlý sluneční vítr potřebuje další urychlování
 - Mechanismus neznámý
 - Velkoškálová elektrická pole?
 - Ale kvazineutralita plazmatu a ambipolární difúze

Družice zkoumají sluneční vítr

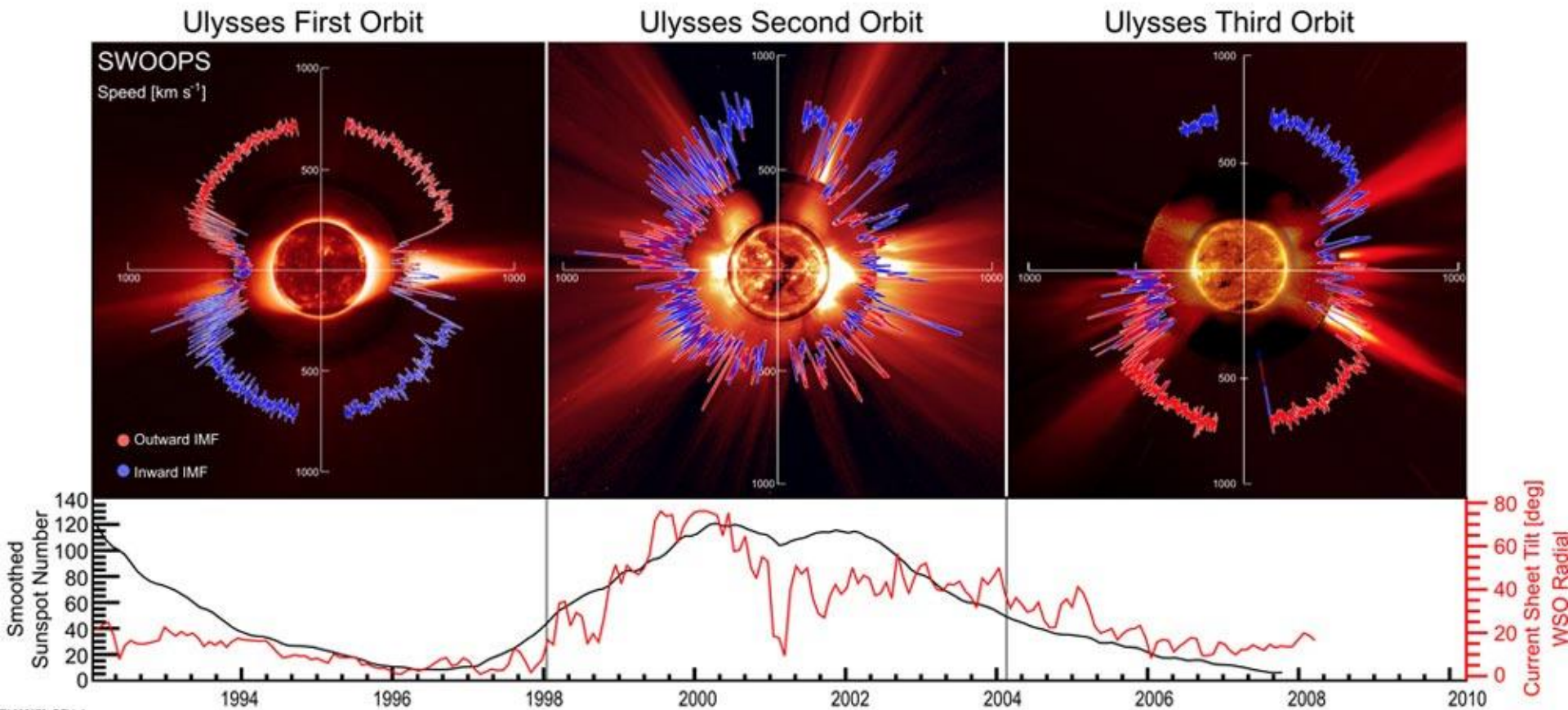
- 1959 Luna 1 měří parametry slunečního větru v souladu s teorií Eugena Parkera
 - Pioneer 5 – stav meziplanetárního prostředí mezi Zemí a Venuší
 - 1965 – obdobně Pioneer 6
 - 1966 – Pioneer 7 – mezi Zemí a Marsem
 - 1967 – Pioneer 8 – jako “sedmička”
 - 1968 – Pioneer 9 – jako “šestka”
- 70. léta 20. století projekt Helios
 - Dvojice sond, heliocentrická dráha, cca 0,3-0,99 AU, Německo
 - Až 65 dní v konjunkci
 - 500 kb paměti (Viking 64 kb paměti)
 - 11 přístrojů, převážně výzkum slunečního větru, ale i IMF, prachu a nebeské mechaniky (zploštění Slunce, efekty OTR)
 - 10 let mise
 - Vlastnosti prachu v zodikálním světle, přítomnost jader helia, rychlý vítr souvisí s koronálními děrami ...
- Ulysses

Ulysses



Orbitální perioda cca 6 let

Sluneční vítr během mise Ulysses



Ke Slunci!

▣ Solar Orbiter (SolO)

- ▣ 7 (10) let mise, oběh 0,28-0,9 AU, inklinace 0-34 stupňů
- ▣ Synoptická pozorování z blízka s vysokým rozlišením a na skloněné dráze
- ▣ 10 přístrojů (4 in-situ detektory, 6 remote sensing přístrojů)
- ▣ Start: 10. únor 2020

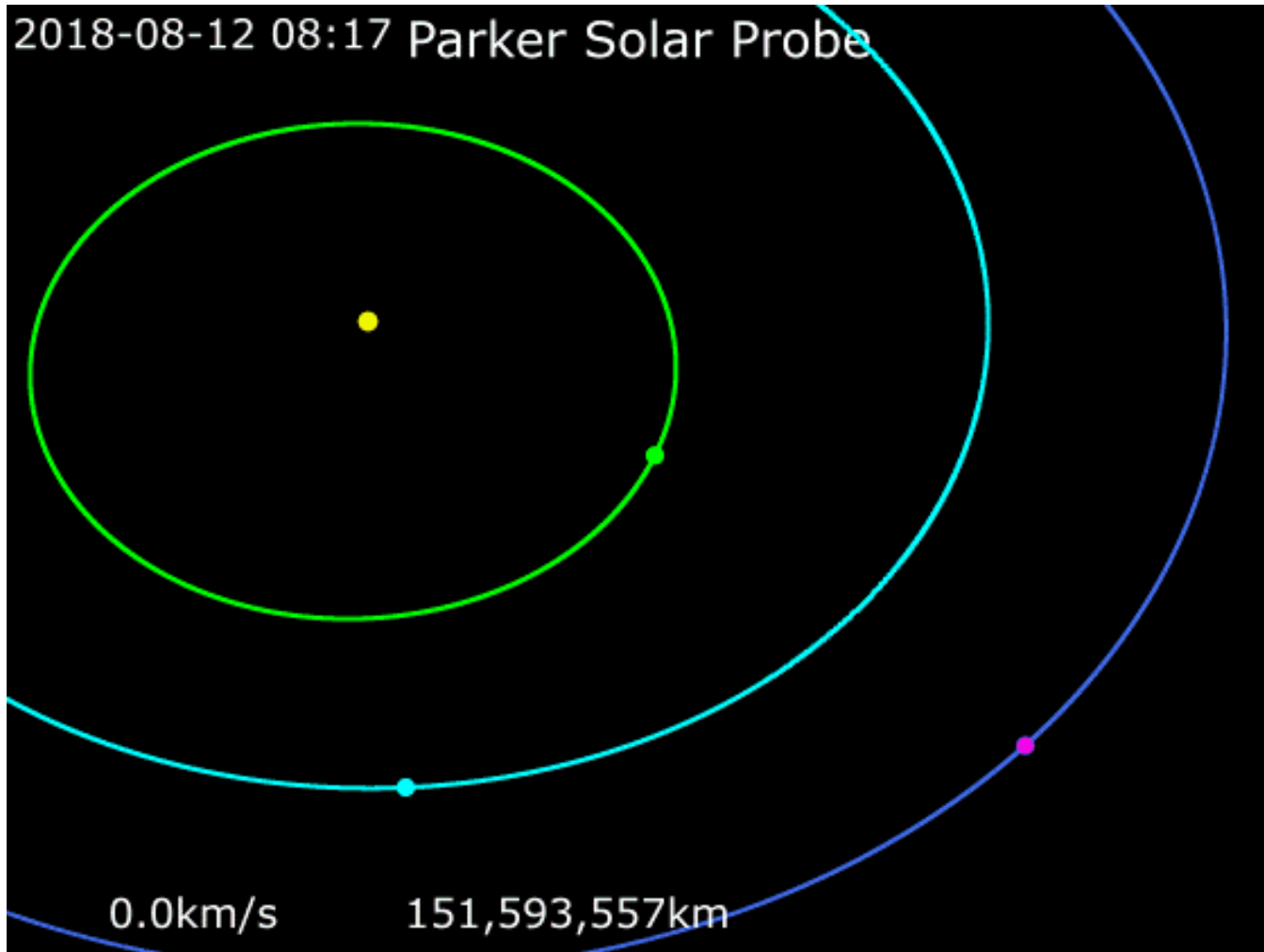


▣ Solar Probe (Solar Probe Plus, od 2017 Parker Solar Probe)

- ▣ Cca 7 let mise, oběh 0,04-0,73 AU, inklinace 3,4 stupně
- ▣ Zaměřena na studium koróny a slunečního větru
- ▣ 4 přístroje (3 in-situ, 1 remote sensing)
- ▣ Start: 12. srpen 2018
- ▣ První sonda pojmenovaná po žijící osobě (!)

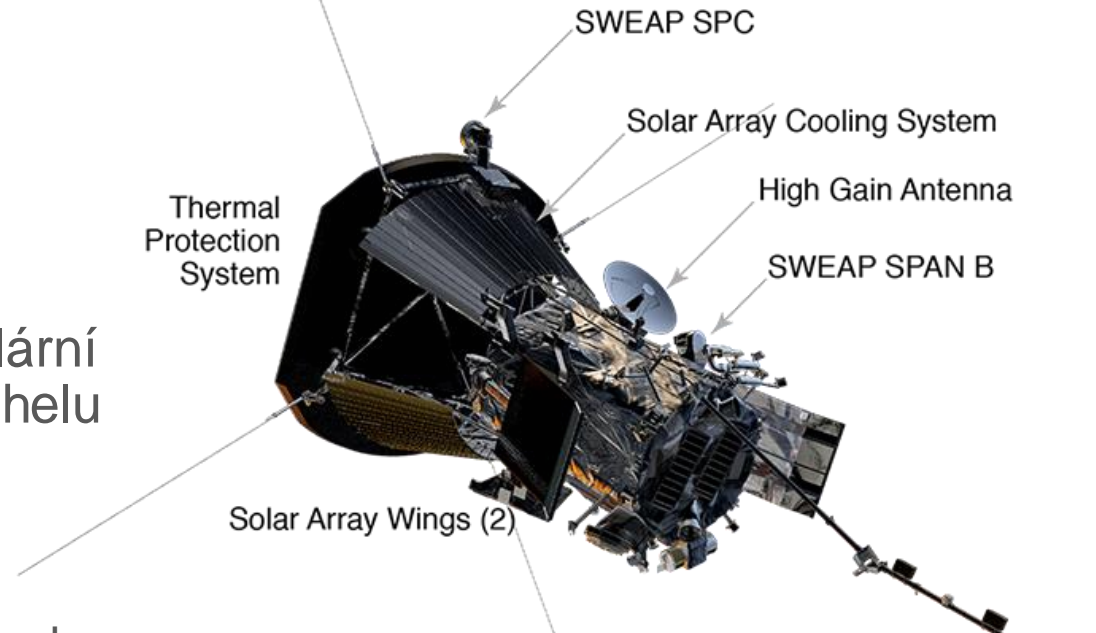


Trajektorie



Parker Solar Probe

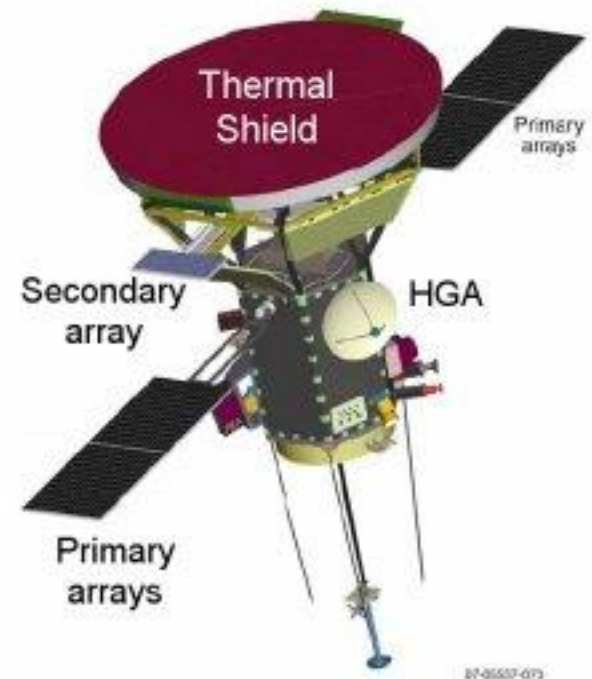
- 685 kg živé váhy
 - 50 kg přístroje
- 1×3×2,3 m
- Aktivně chlazené solární panely, 388 W v perihelu
- Downlink 167 kb/s v 1 AU
 - 0,6 m HGA, download vědeckých dat v pásmu K, vyzařovací výkon 34 W
- Hydrazinové motorky
- Reakční kola pro stabilizaci



- Přístroje
 - FIELDS
 - SWEAP
 - WISPR
 - ISOIS

Extrémní podmínky

- V perihelu teploty cca 1400 stupňů Celsia
 - Tepelný štít z uhlíkového kompozitu, 11,43 cm tlustý
- Záření 500krát větší intenzita než na Zemi
- Dvojice slunečních panelů
 - Primární nechlazené, ty se zatahují pro $D < 0,25$ AU
 - Sekundární aktivně chlazené, zdroj při průletu
- Vědecké přístroje poblíž osy v plném stínu
- V trajektorii přechází kritický bod slunečního větru



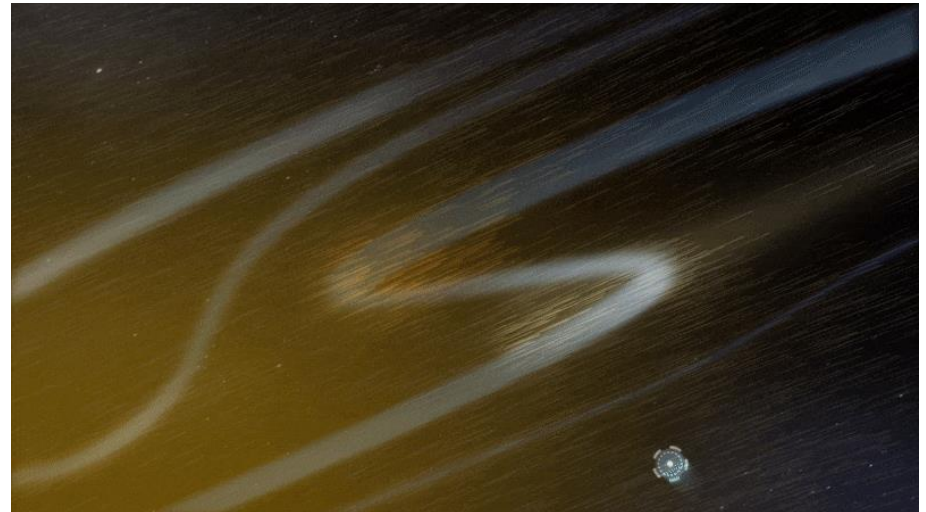
První výsledky

- Příroda byla milostiva
 - Plánován sběr 11 dní během oběhu
 - Už v třetím průletu ale 35 dní, ve čtvrtém 37 a v pátém 50 dní sběr dat
 - To kvůli rychlejšímu downlinku než se čekalo
- Prosinec 2019 – hned 4 články v Nature
- Únor 2020 – speciální číslo Astrophysical Journal
 - 59 článků
- Červen/červenec 2021 – speciální číslo Astronomy & Astrophysics
 - Cca 40 článků

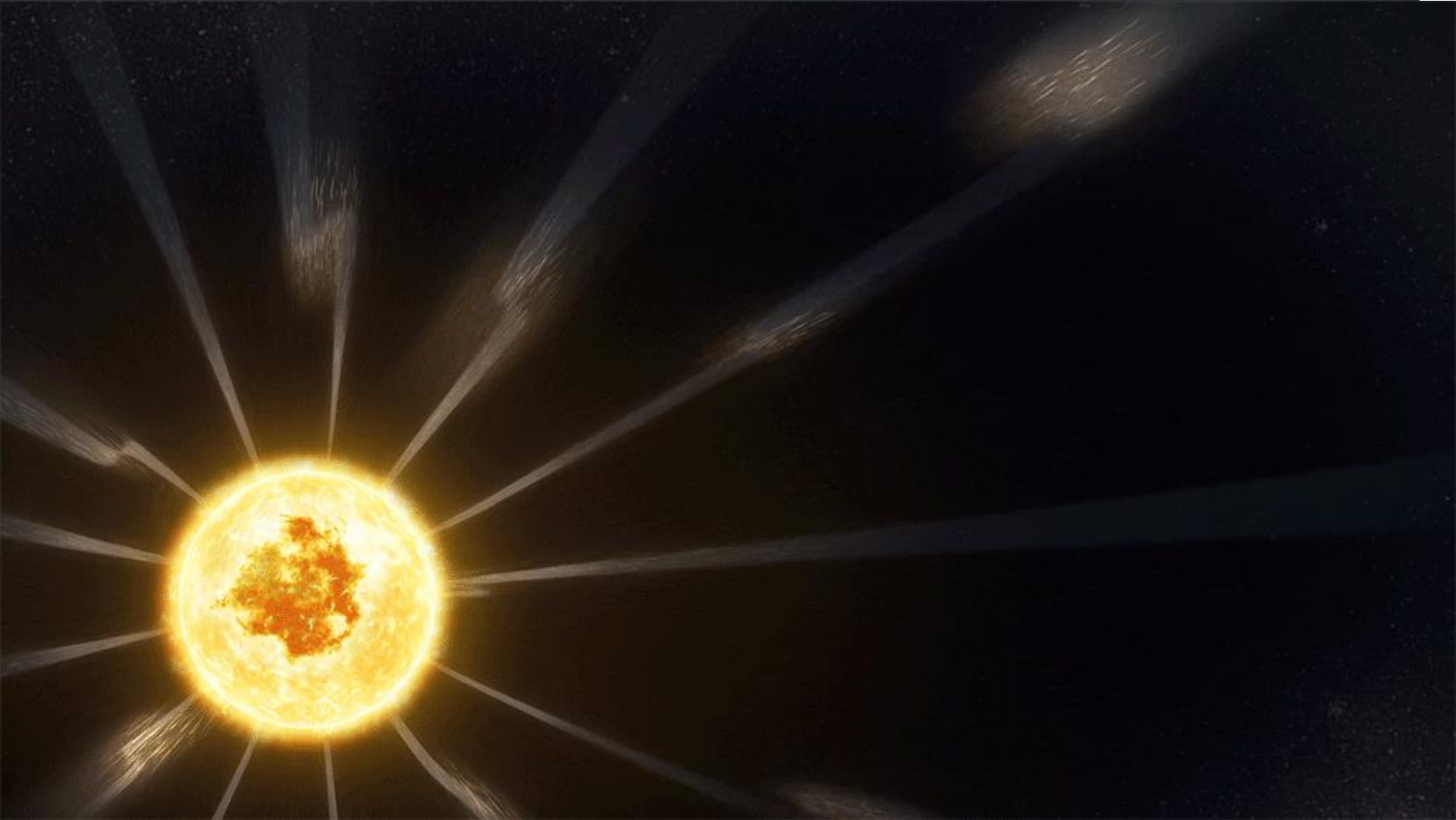
Klikatý magnetismus

□ Magnetické klíčky

- Switchbacks
- Směr magnetického pole se lokálně obrací aby se pak vrátil do původního
- Běžné uvnitř dráhy Merkuru
- “Trvají” od sekund po minuty
- Doprovázeny lokalizovaným proudem částic s vlastnostmi Alfvénových vln

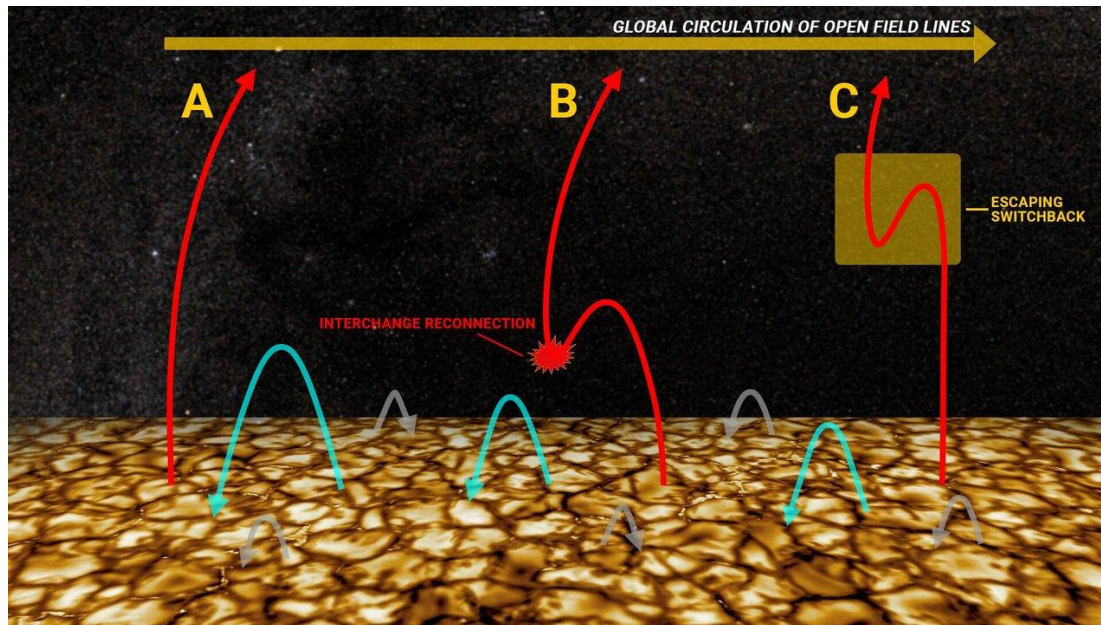


Switchbacks



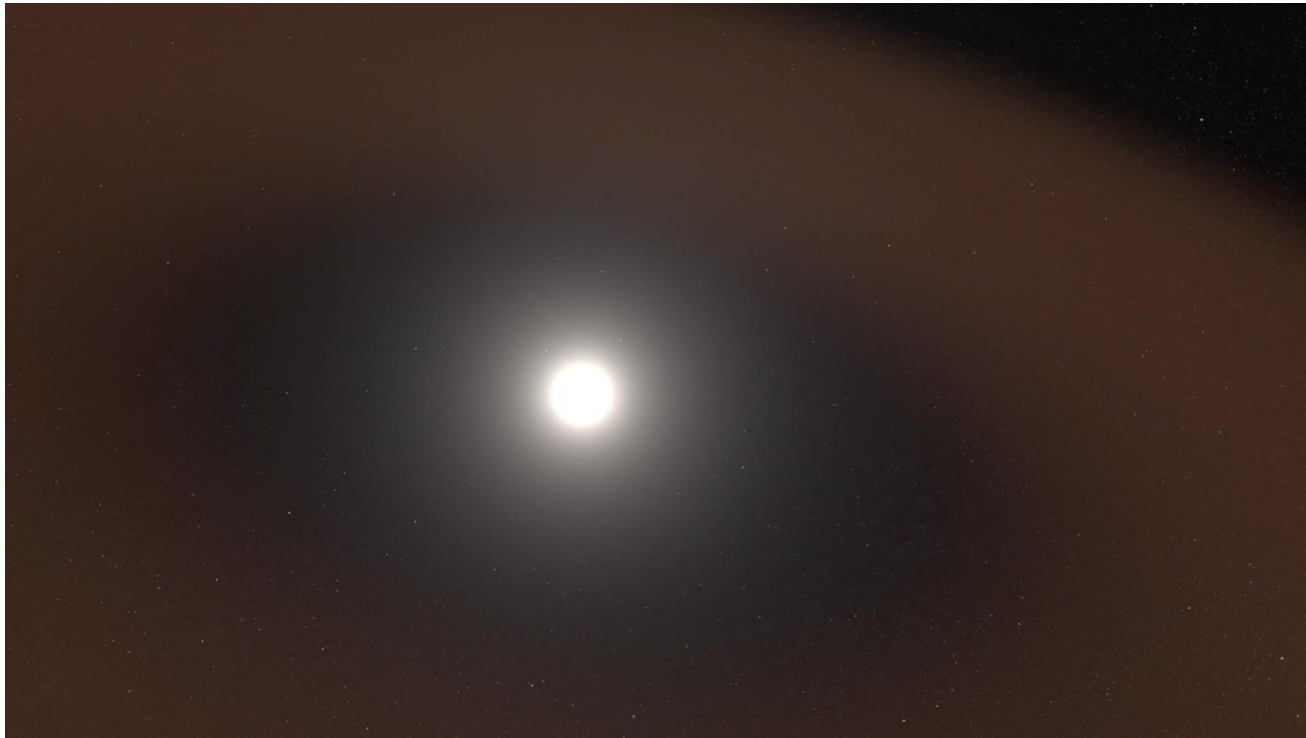
Vznik kliček?

- Zřejmě zbytky struktur vyvržených přímo a magnetizovaných oblastí nižší atmosféry
 - Souvisejí s přepojováním otevřených a uzavřených siločar, vzniká zdánlivý globální pohyb otevřených siločar, registrovaný již dříve
- Není žádná typická velikost
- ? Hrají roli v dodatečném urychlování nebo snad přímo jako zdroj slunečního větru?



Když prach mizí...

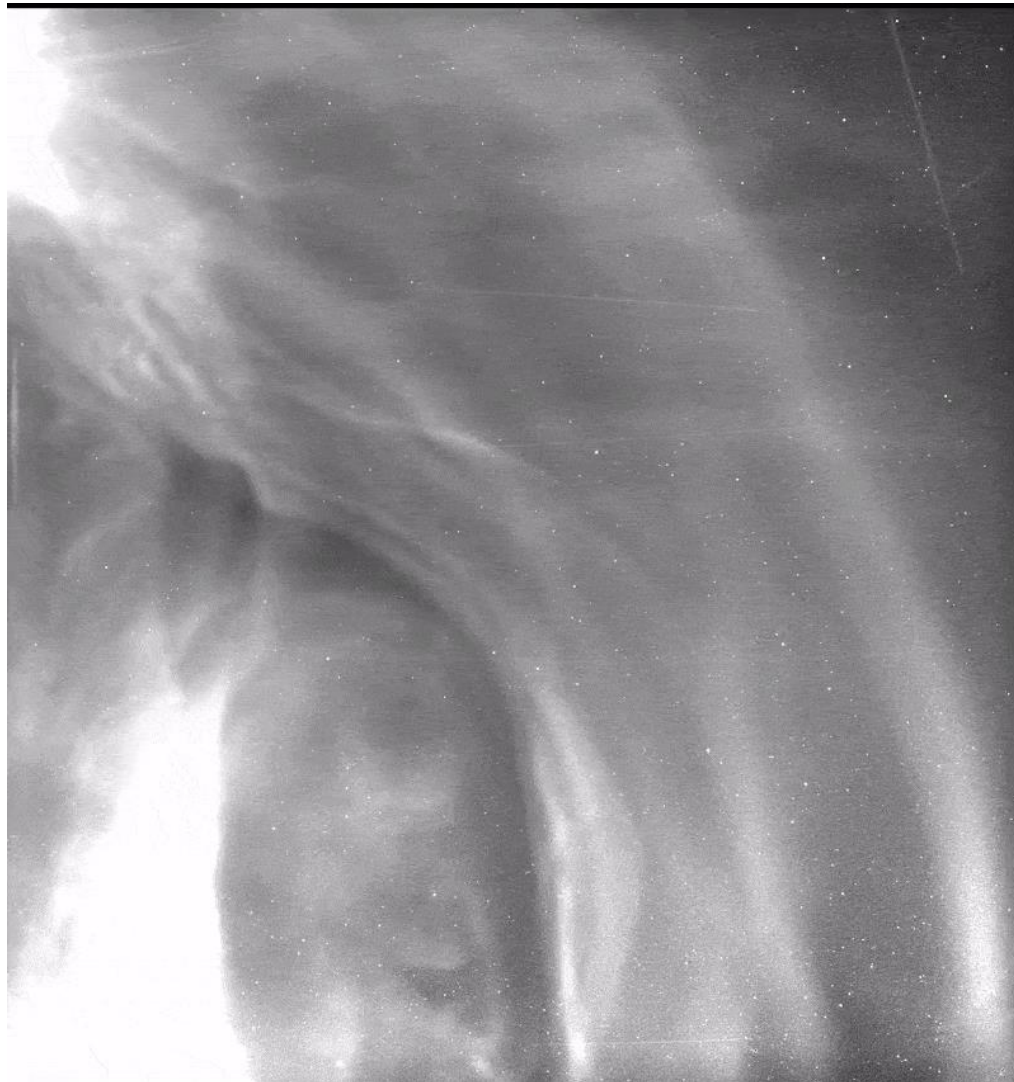
- Bezprašná zóna v okolí Slunce
- Již předtím se očekávalo, že blízko Slunce se všechen prach vypaří



Bezprašná zóna

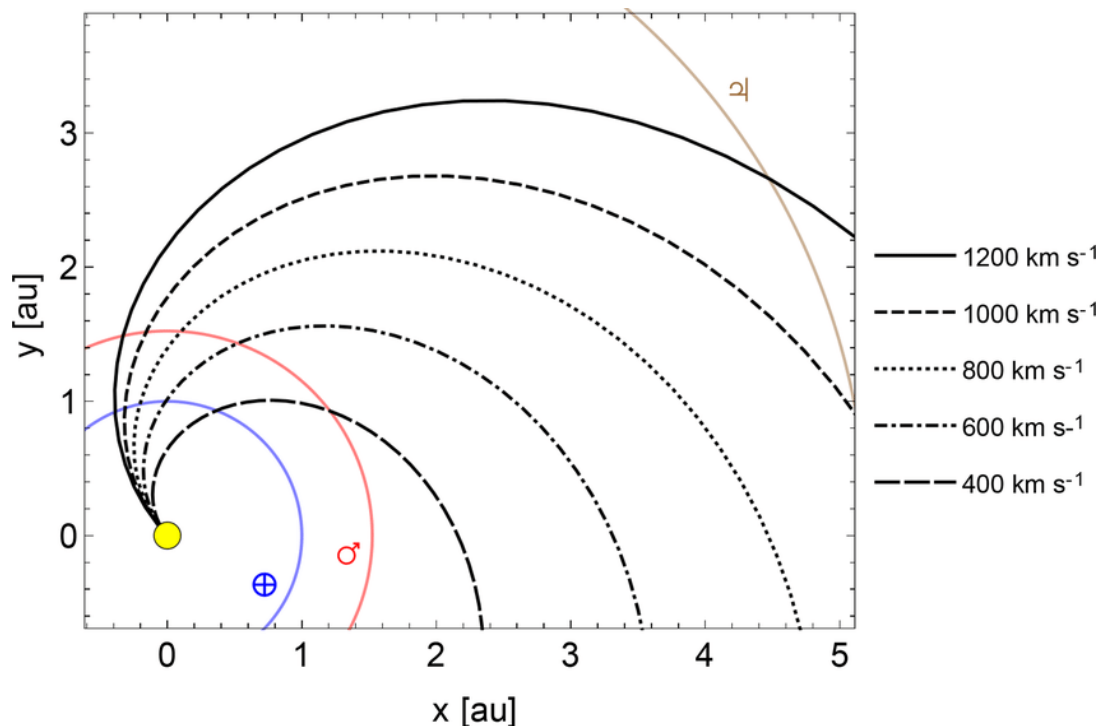
- Pozorování z WISPR
- Koncentrace prachu významně klesá kolem 16 poloměrů od Slunce
- Pod detekční limit v 9 poloměrech od Slunce
- Blíže než 3 miliony km (4 poloměry) zřejmě nemůže být žádný prach
- Dále od Slunce kinematika prachu má hyperbolické dráhy
 - Prach je vymetán od Slunce rychlostí 0,5 až 10 tun za sekund

CME uklízečka



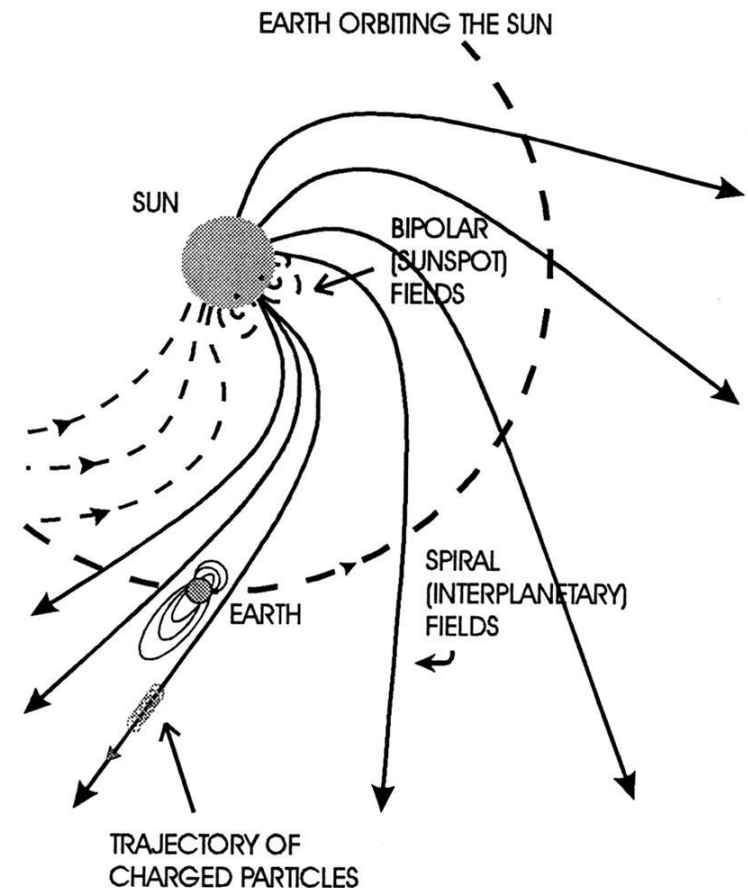
Na slunečním kolotoči

- Rotace slunečního větru (a směr meziplanetárního magnetického pole) má prudší přechod
- Dřívější model
 - Parkerovy spirály
 - Postupný přechod od radiální k tangenciální
 - Strhávání větru podle těchto siločar, efektivita ale klesá, u Země téměř radiální

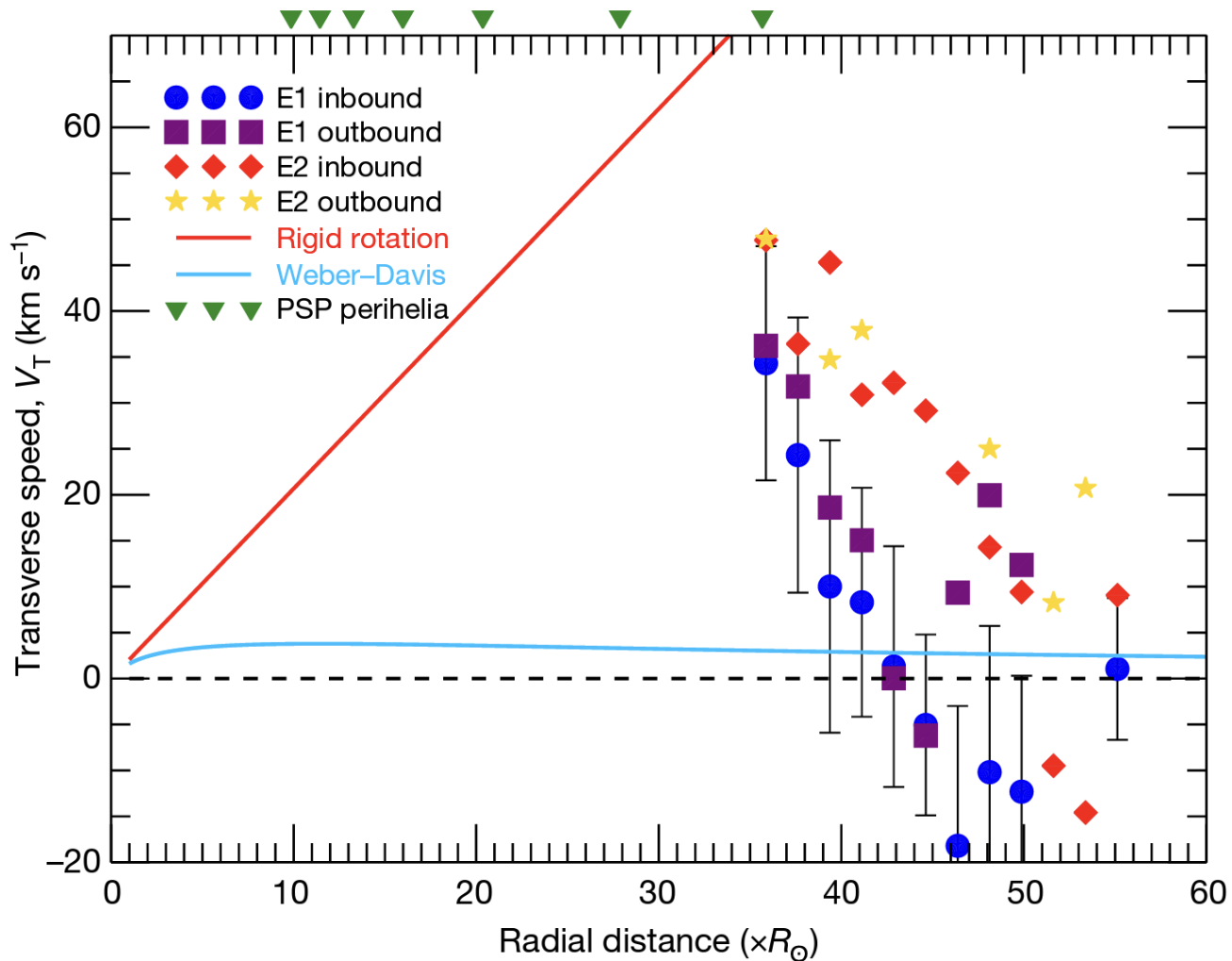


Rotace slunečního větru

- Interpretace SWEAP
- Strhávání je účinnější, ale také rychleji mizí
- Kritický bod přechodu z strhávaného k přímému proudění větru je posunut výrazně od Slunce
- Tangenciální rychlosti jsou cca 30 milionů kilometrů od Slunce asi 10krát větší, než se předpokládalo
- Důsledky: rotační vývoj, protoplanetární disky

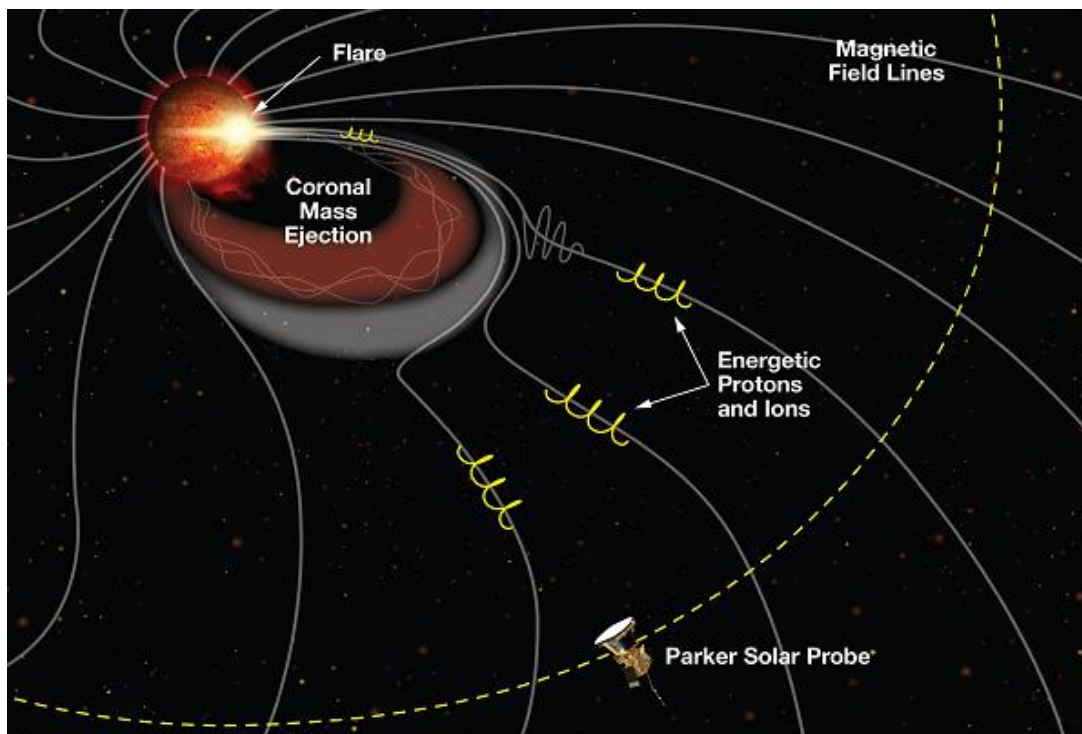


Transverzální rychlost



Výrony těžkých iontů

- Náhlé částicové výrony těžkých iontů a jiných energetických částic
 - Snad souvisejí přímo s procesy (rekonexemi?) ve slunečním větru
 - Rychle se rozptýlí do pozadí
 - Způsobují náhlé změny kosmického počasí, nebezpečné pro lidi

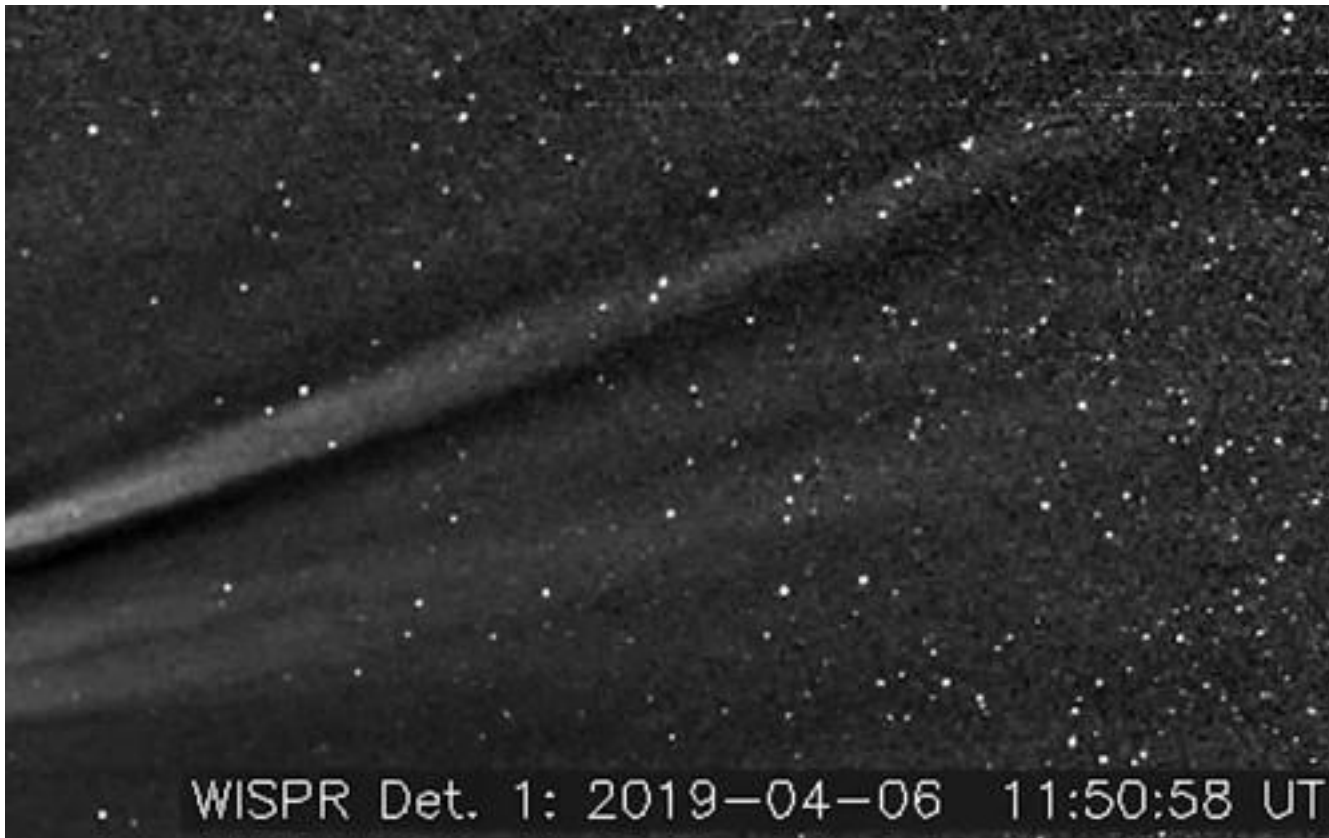


Minizáblesky



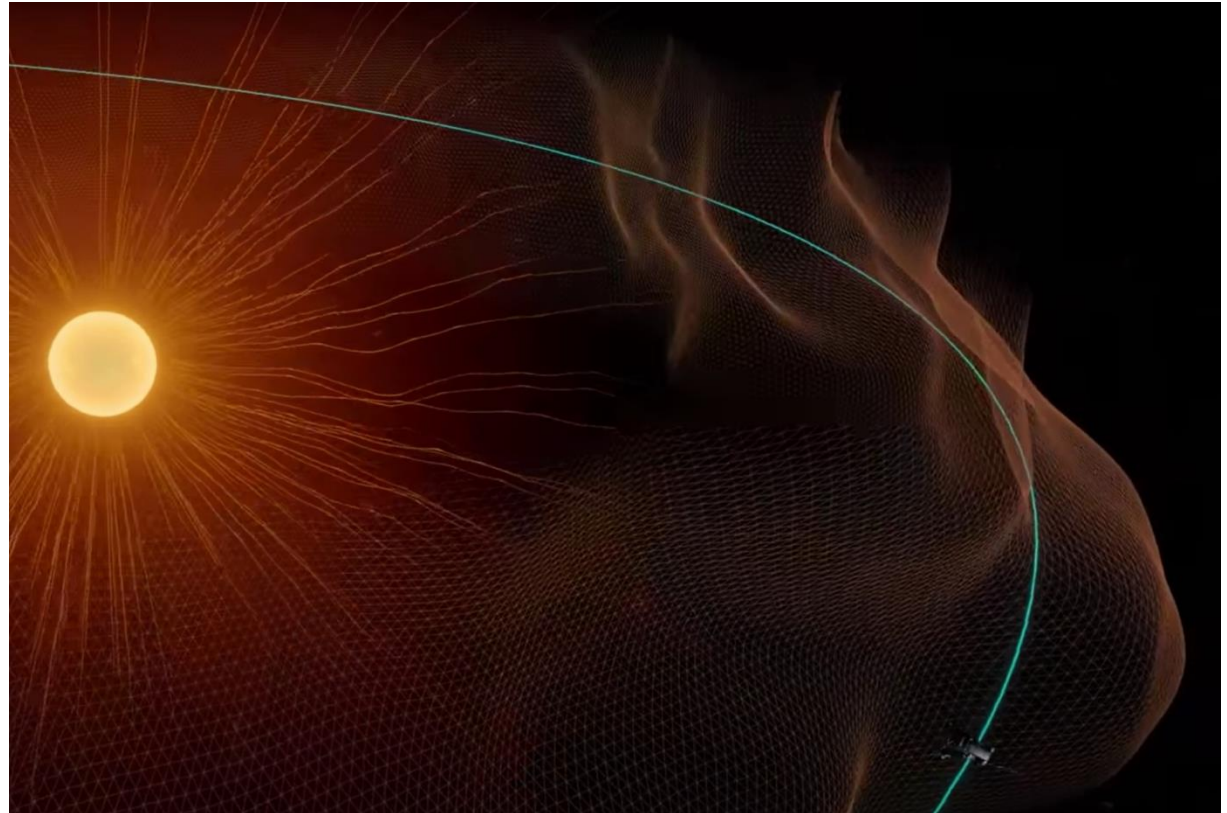
Chuchvalcový vítr

- Sluneční vítr je značně nehomogenní, od Slunce vyvěrá “v chuchvalcích”
- Množství turbulence, něco padne zpět, něco vyjde ven

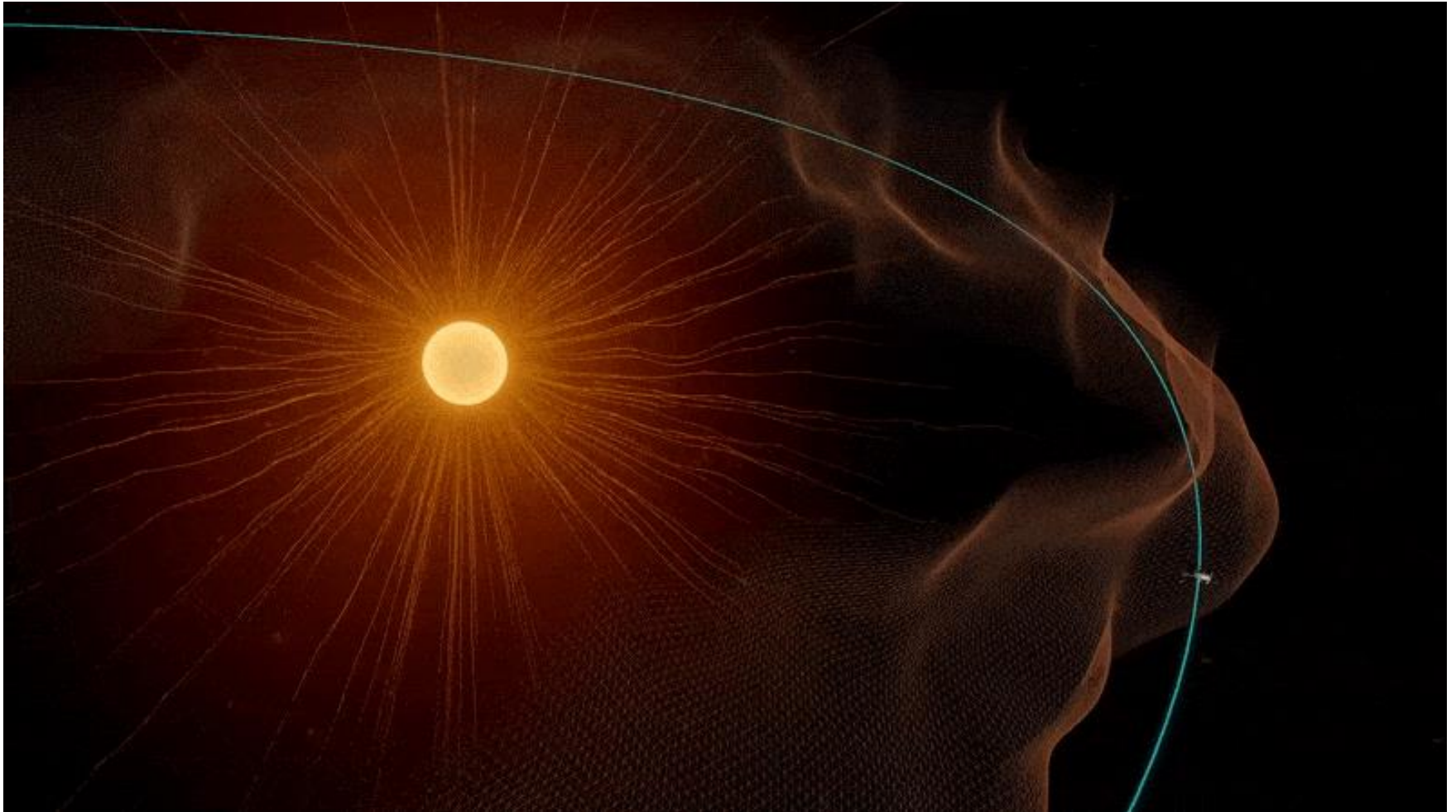


Alfvénův kritický povrch

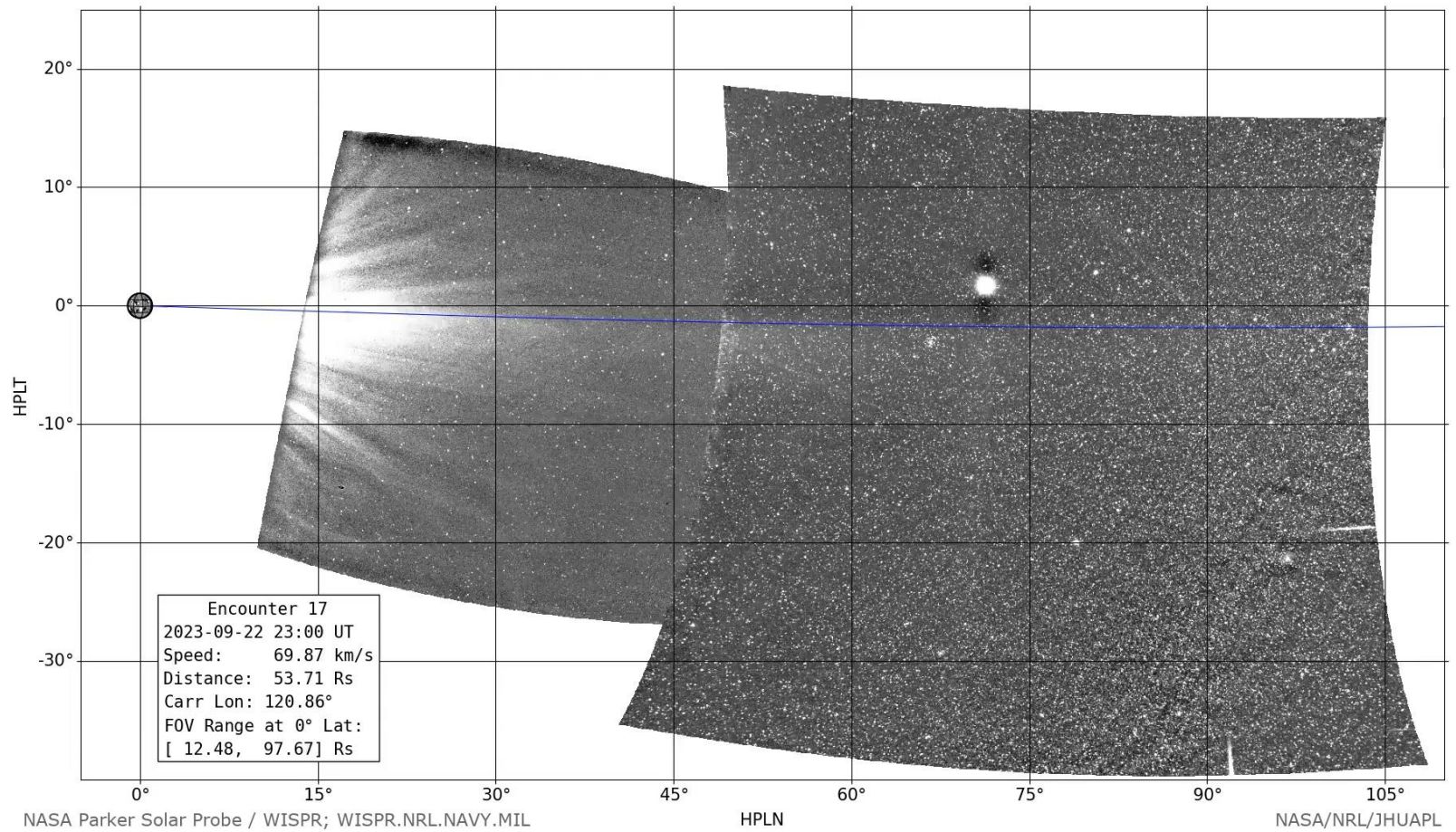
- "Odděluje" atmosféru a sluneční vítr, teorie: 10-20 R_S
- PSP pronikla 28. 4. 2021 a později
- 18,8 R_S
- a pak ještě několikrát



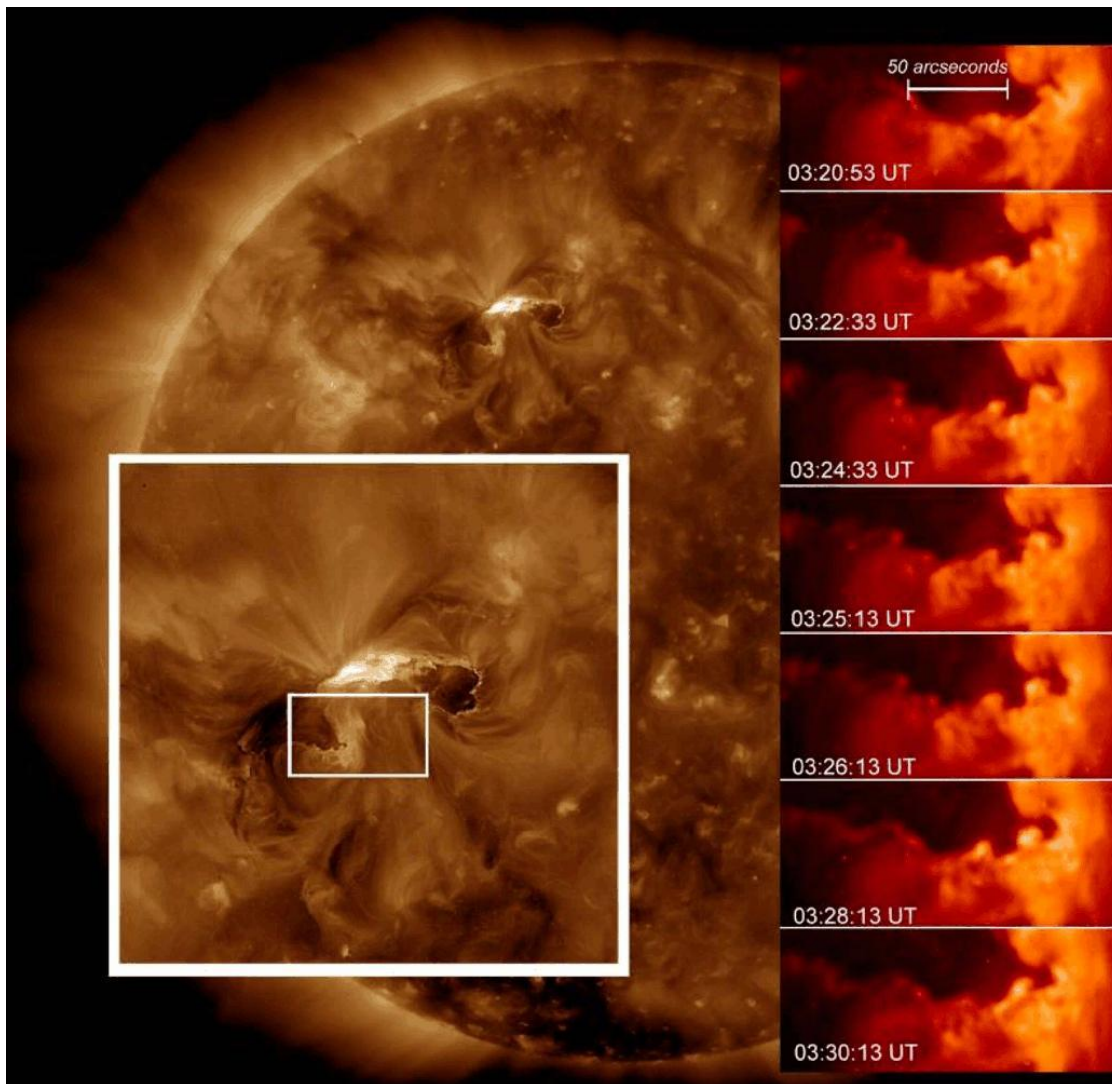
Alfvénův kritický povrch



Průlet korónou



Kelvinova-Helmholtzova nestabilita



- Vzniká na rozhraní s různým prouděním
- Zvyšuje turbulenci
- Pozorováno na okraji CME
 - 20. 11. 2021
- Zvyšuje efektivitu plazmoidů při přiletu k Zemi

Přepisujeme učebnice?

- Zatím spíše ne, pozorování třeba potvrdit
- Ohřev koróny: minizáblesky = rekonexe a Alfvénovy vlny jedno s druhým?
- 21 průletů periheliem, zatím bez zjevných následků na technologii, letos končí primární mise
- Při průletech se podílí na výzkumu Venuše (tepelná emise atmosféry v mikrometrové oblasti)
- Technologické rekordy
 - Nejblíže Slunci (6,1 milionu km, Vánoce 2024)
 - Nejrychlejší objekt (191 km/s)

