

## **KŐVÁRI ZSOLT**

# **Napflerek, csillagflerek, szuperflerek**

### **Láthatatlan napkitörések**

Talán ügyet sem vetünk rá, de tény, hogy a Nap mágneses terének változásaival összefüggő naptevékenység hatásait, pl. az ultraibolya sugárzás intenzitásának növekedését szó szerint “saját bőrünkön érezzük”. Az átlagosan 11 év hosszú kvázi-periodikus napfoltciklus (felfedezőjéről Schwabe-ciklus) maximuma felé haladva az időben nemcsak a napfoltok száma nő meg, de több egyéb jelenség mellett a napkitörések, más néven napflerek gyakorisága is emelkedik. A napfler lényegében a napfelszín közelében felhalmozódó “mágneses feszültség” (mágneses energia) gyors felszabadulása. Egy átlagos napfler során néhány perc alatt annyi energia szabadul fel, amely évtizedekre fedezni tudná az emberiség teljes energiaszükségletét, miközben az eseményről az emberek többsége általában tudomást sem vesz, hiszen a flerek leginkább a látható fénynél rövidebb (ultraibolya, röntgen) hullámhosszakon figyelhetők meg a világúrból. Az ilyen események megfigyelése a csillagászok számára igazán érdekes, akik modern földi és űreszközökkel folyamatosan követik a napkitöréseket kísérő fényváltozásokat az elektromágneses sugárzás széles spektrumában.

### **Bolygóközi viharok**

Kivételesen nagy napkitörések esetén, amikor a napfelszínen megfigyelhető fényjelenséget ún. koronakitörés, közismert nevén CME (az angol “Coronal Mass Ejection” =koronaanyag-kidobódás rövidítése) is kíséri, bolygónkon jóval jelentősebb hatásokra is számítani lehet. A CME nem más, mint a Nap koronájának forró, híg plazmaanyaga (töltött részecskék alkotta forró gáz), amely a Nap légköréből kidobódva “mágneses viharfelhőként” indul útjára a bolygóközi térben. A napciklus előrehaladtával a flerek mellett a CME-k gyakorisága is változik: napfoltmaximum idején naponta átlagosan 3 CME-t lehet megfigyelni, míg napfoltminimum idején a számuk heti egy-kettő. Előfordul, hogy a Föld éppen egy ilyen mágneses felhő útjába kerül, azonban legtöbbször a Föld mágneses tere és sűrű légköre megvéd minket a CME részecskezápórától, bolygónk felszínét nem, vagy csak alig éri el a kitörés során kiszabaduló nagy energiájú szubatomi részecskék (többnyire protonok). A töltött részecskék a Föld mágneses terének erővonalai mentén “bespiráloznak” a



1. ábra: Sarki fény Alaszkában. Forrás: Wikimedia Commons

mágneses pólusok felé, amelynek következtében ekkor szemet kápráztató sarki fényben gyönyörködhetünk (1. ábra). Ám szépségük mellett a nagyobb mágneses viharok komoly károkat is okozhatnak a földfelszíni távközlési hálózatokban, zavarok jelentkezhetnek a rádiós kommunikációban, nem beszélve a részecskesugárzás emberre gyakorolt hatásáról, ugyanis - más részecskesugárzáshoz hasonlóan - a kitettség fokozott egészségügyi kockázatot jelent a pilóták, vagy az éppen a Nemzetközi Űrállomáson tartózkodó személyzet számára.

## “GPS signal lost”

Az elmúlt évtizedekben számos feljegyzés született arról, hogy a Naptól eredő mágneses felhő a technikai civilizációnk számára kedvezőtlen hatásokkal járt: 1972. április 4-én egy hatalmas napkitörés Illinois államban a telefonhálózatban okozott károkat; egy másik nagy napkitörés következtében 1989 márciusában Kanada egyes részein hosszú órákig tartó áramkimaradások voltak; a 2000. július 14-én feljegyzett napkitörés pedig műholdak elektronikájában okozott károkat. Ha autóba ülünk, természetesnek vesszük, hogy rendelkezésre áll a navigációt segítő GPS rendszer. Pedig 2006. december 5-én egy bolygónkat elérő CME 10 percre elnémította a GPS hálózatot biztosító műholdak Föld felé irányuló kommunikációját. A sort lehetne folytatni, azonban volt egy napkitörés, az ún. Carrington-esemény, amely becsült energiája több nagyságrenddel meghaladta bármely másik ismert eseményét. 1859. szeptember 1-én Richard Carrington amatőr csillagász egy nagy napfoltcsoportot vizsgálva a foltokból kiinduló két kifényesedésre lett figyelmes, amelyek 5 perc múlva eltűntek. Néhány órával később a Földet egy hatalmas mágneses vihar

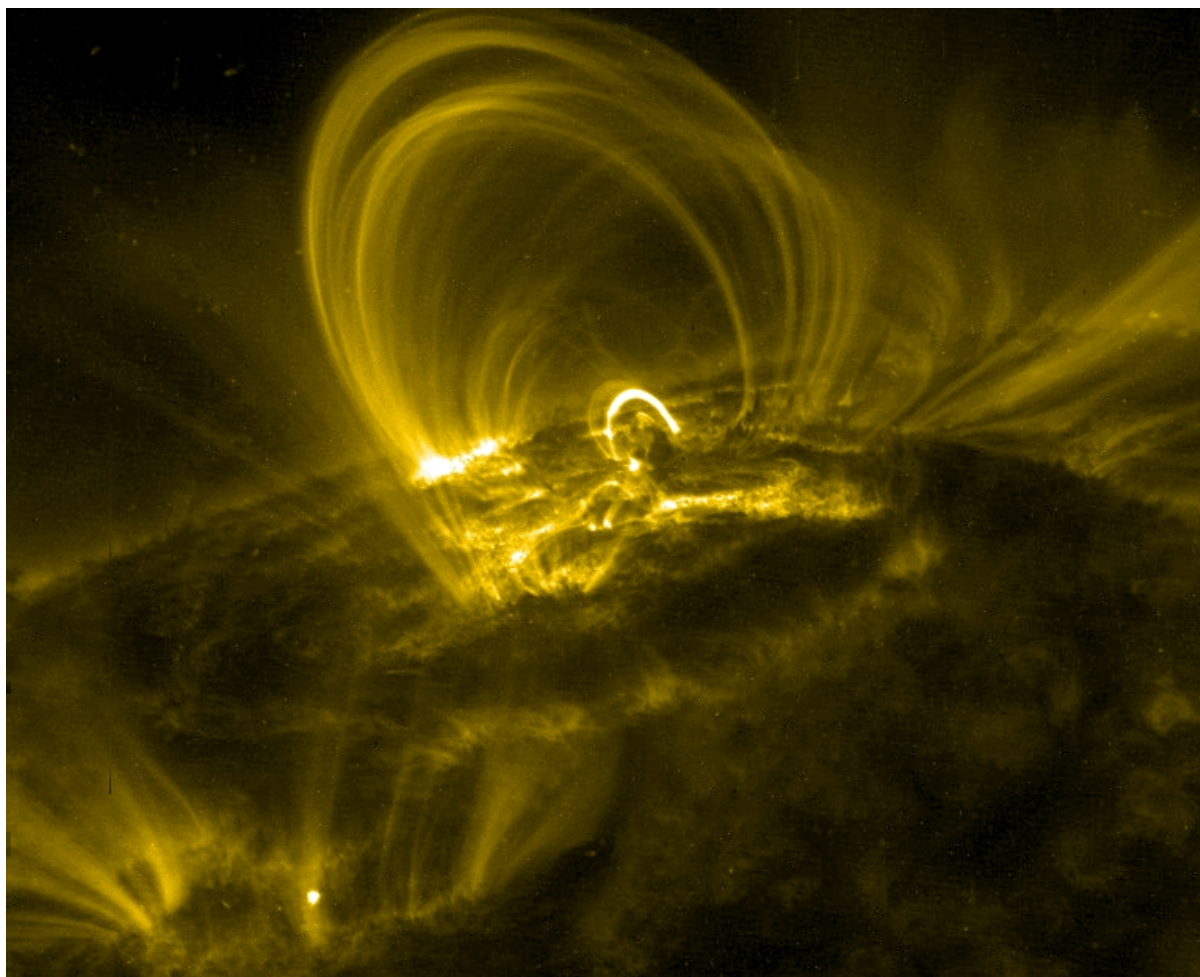
érte el. Amikor Carrington erről tudomást szerzett, erős gyanú ébredt benne, hogy az általa észlelt napkitörés és az utána bekövetkező földi mágneses vihar között szoros kapcsolat lehet. Aznap éjszaka az egész égboltot beragyogta a sarki fény, amely a korabeli beszámolók szerint apokaliptikus hangulatot idézett. Akkoriban még távíróhálózatot használtak a Földön, amelyben a mágneses vihar komoly károkat okozott: számos állomás kigyulladt, a kezelők közül többen áramütést szenvedtek. Képzeljük el, mekkora katasztrófával járna egy hasonló nagyságú esemény a mai technikai civilizáció számára, amikor az életünk minden percében rá vagyunk utalva az internetre, a kommunikációs hálózatokra, vagy a GPS-rendszerre!

## Űridőjárás-előrejelzés

Szerencsére a carringtonihoz hasonló nagyságrendű események bekövetkezésének valószínűsége - tehát, hogy a napfoltok körül hasonlóan nagy mágneses energia akkumulálódjon, továbbá, hogy a flert követően a Föld éppen a kilövellt CME útjába kerüljön - az eddigi tapasztalatok alapján csekély, de nem elhanyagolható. Korlátozott védekezésre akkor van lehetőség, ha a kitörést és az annak nyomán ezer kilométer per másodperc sebességgel a Föld felé száguldó mágneses plazmafelhőt időben észleljük és megfelelő védelmi intézkedések teszünk: az űrben dolgozók védőkapszulákba zárkozhatnak, az űreszközök érzékeny műszereit ki lehet kapcsolni vagy alkalmas pajzzsal védeni lehet azokat, a légiközlekedést ideiglenesen le lehet állítani stb. Persze legjobb volna, ha már a kitörés idejét, heliografikus pozícióját és nagyságát is előre tudnánk jelezni. Az erre irányuló napfizikai kutatásokat űridőjárás-előrejelzés néven szokás említeni, hiszen a meteorológiai előrejelzésekhez hasonlóan itt is az a cél, hogy egy sztochasztikus rendszer eseményeit megjósoljuk. Ettől ugyan még messze vagyunk, de a Napot jelenleg is 7 űreszköz figyeli folyamatosan, hatalmas mennyiségű adatot gyűjtve egy jövőbeli űridőjárás-előrejelzés feltételeinek megteremtéséhez. Azonban a Napon megfigyelt folyamatokat is jobban értjük, ha az égbolton minél több Naphoz hasonló mágnesesen aktív csillagot keresünk, és az azokon megfigyelt folyamatokat összegezve próbálunk átfogó képet kapni a nap- és csillagflerekről. Az ilyen vizsgálatokból az is kiderül, fel kell-e készülnie az emberiségnek egy a Carrington-eseménynél is nagyobb napkitörésre, egy "szuperflerre".

## Összekuszált mágneshurkok

Mielőtt áttérnénk a csillagokon megfigyelhető flerekre, röviden összefoglaljuk, mi is az, amit napflerekről eddig tudunk. Amint az eddigiekből már kiderült, a napfler rövid idő alatt bekövetkező hatalmas energiefelszabadulás, a napfelszín egy korlátozott tartományában jelentkező kifényesedés. A kifényesedés maximuma, azaz a fler energiaspektrumának maximuma az elektromágneses tartománynak a látható fénynél rövidebb hullámhosszú részébe, a röntgen- és ultraibolya tartományba esik, vagyis a flerek jelentős részét "röntgenflerként" észleljük. Ritkán azonban előfordul, hogy nagyobb flerek a látható fényben is megfigyelhetők, tehát nem csak a több tízezer-százezer fokos kromoszférában és a százezer-millió fokos napkoronában, hanem a Nap fotoszférájában is látszanak. Ezek az ún. "fehér flerek", amelyre egy szép példa a Carrington-esemény. Ugyanakkor a flerek hatása gyakran a gammasugárzástól a mikrohullámokon át egészen a rádióhullámokig megfigyelhető. A napflerek létrejötte mögött húzódó fizikai folyamatokat Carrington idejében



2. ábra: Mágneses struktúrák a Nap koronájában. A napfelszín fölé emelkedő hatalmas mágneses fluxusköteg hurkoka talppontjainál ellentétes mágneses polaritású területeket (napfoltokat) találunk. Forrás: Wikimedia Commons

még nem igazán ismerték, de ma már egyre jobban értjük azokat. A kulcs a napdinamó, amely globális és lokális folyamatok együtteseként azt eredményezi, hogy a Nap mágneses tere folyamatosan változik. Említettük a napfoltciklust, ami a napdinamó működésének egyik megfigyelhető bizonyítéka. De a napfelszínen (fotoszférán) a sötét napfoltok környezetében fényes fáklyamezőket (“plázsokat”) is látunk, amelyek ultraibolya fényben a kromoszférában még feltűnőbbek. A napfoltok többnyire csoportokban fordulnak elő az ún. aktív vidékeken. Egy ilyen aktív vidék fölé emelkedő plazmakötegekből álló hurokrendszer mágneses topológiáját mutatja a **2. ábra**, amely látványos bizonyítéka annak, hogy a foltokat és a felsőbb rétegek (kromoszféra, korona) struktúráit a közös mágneses eredet köti össze. A flereket az ilyen aktív vidékek feletti kusza mágneses hurkok “rekonnekciója”, azaz átkötődése idézi elő. Az átkötődés a mágneses tér energiasűrűségének csökkenésével jár, a felszabaduló energia kifényesedést okoz, amelyet olykor anyagkidobódás, azaz CME is követ. A CME-k kialakulása azonban nem minden esetben kapcsolható flerekhez, egyéb mechanizmusok is ismertek, amelyekre itt nem térünk ki.

## Szuperfler-vadász űrtávcsövek

A napaktivitás jelenségeihez hasonló események megfigyelése más csillagokon évszázadok óta foglalkoztatja a csillagászokat. Ma már tudjuk, hogy a Napon megfigyelt mágneses jelenségek más csillagokon - ha nem is pontosan úgy, de legalábbis - hasonlóképpen zajlanak: a napfoltokhoz hasonlóan látunk csillagfoltokat, a napflerekhez hasonlóan pedig látunk csillagflereket, amelyek közös nevezője a mágneses tér. Azonban a napflerekkel ellentétben a csillagflerek szisztematikus megfigyelésére a közelmúlt űrmisszióit (*Corot*, *Kepler*, *TESS*) leszámítva nem igazán volt lehetőség, hiszen a folyamatos megfigyelést a földfelszíni eszközök esetén a nappalok szakítják meg és kedvezőtlen időjárási körülmények nehezítik, de optimális feltételek esetén is kicsi annak a valószínűsége, hogy alkalmas eszközökön folyamatos távcsődő állna rendelkezésre egy olyan célra, amely lényegében előre nem tervezhető események bekövetkezésére vár. A csillagflerek megfigyelése e szempontból hasonlít a földrengések megfigyelésére, hiszen ez utóbbi esetben is a mérőeszközök folyamatos üzemére van szükség ahhoz, hogy egy vagy több véletlenszerűen bekövetkező eseményt sikerüljön észlelni. Az említett űrmissziók előnye, hogy hosszabb időszakon keresztül egyszerre sok csillag megfigyelésére alkalmasak. Különösen értékes adatokat szolgáltatott a 2009-2013 között futó eredeti *Kepler*-misszió, amely a Hattyú, a Lant és a Sárkány csillagképek határán elterülő “*Kepler*-mező” 150 ezer csillagának rögzítette a fényváltozásait korábban elképzelhetetlen pontossággal folyamatosan, közel négy éven keresztül.

A *Kepler*-mező objektumai között számos Naphoz hasonló törpecsillag van, így lehetőség nyílt arra, hogy összehasonlítsuk az ilyen csillagokon előforduló flerek gyakoriságát és nagyságát a napflerekével. Ezekből a vizsgálatokból hamar kiderült, hogy a Nap flerjeinél ezerszer-tízezerszer erősebb ún. “szuperflerek” is előfordulnak olyan csillagokon, amelyek jóformán alig különböznek a Naptól. Ebből akár arra is következtethetünk, hogy a Nap körül keringő Föld e tekintetben szerencsés, ugyanis nincs kitéve nagy számban előforduló és nagy energiakibocsátással járó szuperflereknek. Az összehasonlítás kedvéért: a szuperflerek bolometrikus energiája, tehát a teljes energiaspektrumban mért összenergiája legalább tízszerese a Carrington-esemény becsült teljes energiájának, ami kb.  $10^{33}$  erg volt (Cliver és Dietrich 2013). Tehát a Carrington-eseményt még nem soroljuk a szuperflerek közé, mivel a “szuper” előtagot a  $10^{34}$  erg (=  $10^{27}$  Joule) energiát meghaladó flerekre szokás használni. Itt jegyezzük meg, hogy a szuperfler egy önkényes elnevezés, nem tudományos kategória.

## A lenyugvó Nap ereje

Maehara és mtsai. (2012) vizsgálata szerint a Nap-típusú csillagokon észlelt flerek akár egymilliószor erősebbek lehetnek az átlagos napflereknél. Notsu és mtsai. (2019) szerint Naphoz hasonló, de fiatal, gyorsan forgó csillagokon akár heti gyakorisággal is előfordulhatnak szuperflerek. Az eredmény több okból is elgondolkodtató. Felmerülhet a kérdés, hogy milyen folyamatok vezetnek a szuperflerek kialakulásához Naphoz hasonló csillagokon. Ugyanúgy zajlik minden, mint a Napon, csak nagyobb energiaszinteken? Vajon hasonlóan nagy energiafelszabadulással járó szuperflerek a Napon is lehetségesek? Csillagfejlődési modellek alapján tudjuk, hogy a Nap fiatal korában jóval gyorsabban forgott, tehát a napaktivitási jelenségek is erősebbek voltak, így valószínű, hogy a napkitörések nem



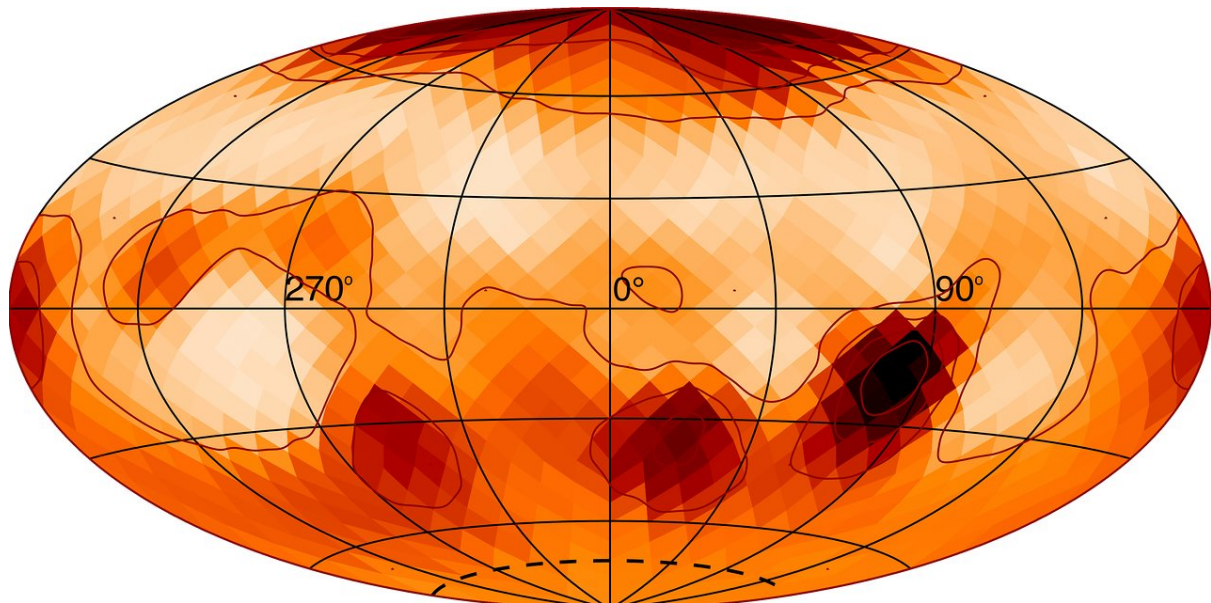
csak hogy sűrűbben jelentkeztek, de a fiatal Napon szuperflerek is előfordulhattak. Becslések szerint a korai Napon a gyakoribb szuperflerekkel járó mágneses viharok olyan pusztítóak lehettek, amelyeknek a földi magnetoszféra kevésbé volt képes ellenállni, a megtépázott légkör pedig aligha tudta megvédeni a szárazföldi élővilágot a flerekkel járó megnövekedett ultraibolya sugárzástól (vö. Vida és mtsai. 2017). Így akár tömeges fajkihalások is előfordulhattak, miközben a tengeri életformák az ósóceán mélyén feltételezhetően védve maradtak. A 4,5 milliárd éves Nap forgása mostanra lelassult, központi csillagunk ” lenyugodott”, a napflerek gyakorisága és energiája lecsökkent, miközben bolygónkon a szárazföldek is benépesültek. Nem igazán látjuk nyomát a földtörténeti közelmúltban esetleges szuper napkitörés miatti kihalásoknak. Notsu és mtsai. (2019) mégis azt jósolják, hogy a nyugodt Napon is előfordulhatnak szuperflerek: csekély, de nem nulla annak a valószínűsége, hogy a Nap akár a következő 100 évben szuperflert fog produkálni. Azonban egy ilyen szuperfler nem az élővilág számára jelent igazi fenyegetést, hanem inkább a sérülékeny technikai civilizációkra nézve. Vagyis nem az a kérdés, hogy lesz-e szuper napkitörés, hanem az, hogy mikor és hogy vajon képes lesz-e az emberiség úrrá lenni annak várható következményén, a technikai civilizáció részleges, vagy teljes összeomlásán.

## Szuperflerező szörnyek

Eddig a flerek kapcsán a Napról és a Naphoz hasonló ún. fősorozati csillagokról szóltunk. Láttuk, hogy a fiatal, gyorsan forgó csillagok mágneses aktivitása nagyobb, mint a ”lenyugodott” lassabban forgó társaiké. A fősorozaton töltött hosszú idő alatt a csillagszéllel és a koronaanyag-kidobódásokkal távozó anyag miatt a csillag nem csak tömeget veszít, de a mágneses fékeződés következtében perdülete is csökken, a csillagok forgása lelassul. A fősorozat után, amikor a csillag magjában elfogy a hidrogén, a hélium-magot a gravitáció összenyomja, a felforrósodó mag körüli héjban égni kezd a hidrogén, amely miatt a csillag külső burka felfúvódik, a csillagból vörös óriás lesz. A kitáguló burk forgása a perdületmegmaradás miatt tovább lassul. Azt várnánk, hogy ekkor a mágneses aktivitás még alacsonyabb szintre jut, azonban a vörös óriások között jelentős számban találunk foltos változócsillagokat, felszínükön a napfoltokhoz hasonló, mágneses eredetű csillagfoltokkal, olykor pedig csillagflerekkel. Sőt nem is kicsikkel! Igazi óriásokhoz méltó szuperflerekkel, amelyek a Nap-típusú fősorozati csillagok szuperflerjeihez képest akár 3-5 nagyságrenddel nagyobb energiájúak!

A mágneses aktivitás a vörös óriásokon tehát nagyon is jelen van, amelynek első közvetlen bizonyítéka a  $\zeta$  Andromedae foltos felszínének interferometrikus képe volt (**3. ábra**, Roettenbacher és mtsai. 2016). A lelassult forgás miatt azonban még nem teljesen világos, milyen folyamatok eredménye lehet az olykor gigantikus szuperflerek létrejötte. Számos példa van rá, hogy szoros kettőscsillagok esetén a kötött keringés következtében megmaradhat a gyors forgás, ami fenntarthatja a mágneses aktivitást. Más esetekben egy mágneses térrel rendelkező közeli óriásbolygó mágneses kölcsönhatása lehet az ok (lásd pl. Ferreira 1998; Rubenstein és Schaefer 2000). A közelmúltban Katsova és mtsai. (2018) érdekes eredményre jutottak: az óriáscsillagokon megjelenő szuperflerek során felszabaduló gigantikus energiát úgy tudták magyarázni, hogy dinamómodelljükben a Napéval ellentétes, ún. antiszoláris differenciális rotációt feltételeztek, azaz olyan forgást, amikor - a Nappal ellentétben - nem a csillag egyenlítője forog leggyorsabban, hanem az egyenlítőtől a pólusok felé haladva nő a szögsebesség. Csak így sikerült akkora mágneses energiákat generálni, amelyeket egyes óriáscsillagokon megjelenő gigantikus flerekben mértek. Érdekes

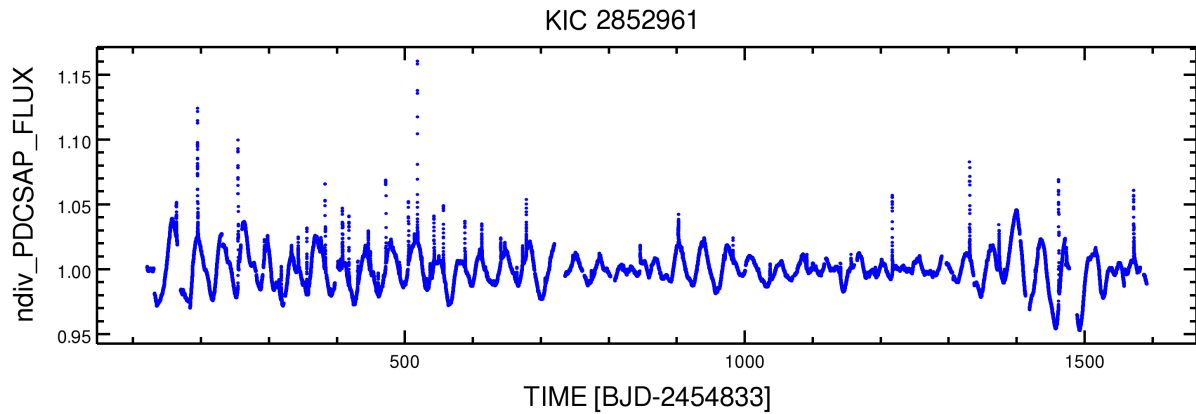
megjegyezni, hogy eddig alig néhány esetben találtak antiszoláris differenciális rotációt, viszont az ilyen csillagok mindegyike óriáscsillag volt (Kővári és mtsai. 2017).



3. ábra: A  $\zeta$  Andromedae foltos felszínének interferometrikus képe. Forrás: Rachael Roettenbacher

A differenciális rotáció mellett a csillagdinamók működése során a konvektív turbulencia is fontos szerepet kell hogy kapjon, ugyanis a két hatás együtt szükséges ahhoz, hogy pl. a napdinamót és a vörös óriáscsillagokban működő dinamóméchanizmust eltérő léptékekben, de végső soron közös alapon lehessen tárgyalni (lásd Lehtinen és mtsai. 2020). Ez arra enged következtetni, hogy a mágneses dinamó eredményeként a Napon megjelenő napkitörés valamint egy szuperfler egy vörös óriáscsillagon lényegét tekintve ugyanannak a fizikai folyamatnak a megnyilvánulása, csupán a lépték más. Ezt a következtetést támasztja alá a *Kepler*-mező egyik vörös óriáscsillaga, a KIC2852961 számú csillag fényváltozásainak alaposabb vizsgálata (Kővári és mtsai. 2020). A foltos csillag forgása miatt kb. 35,5 napos periódussal változtatja fényességét attól függően, hogy a foltosabb (ezért hidegebb, azaz halványabb) felét mutatja, vagy a kevésbé foltos fényesebbet (**4. ábra**). Kezdetben, a közel 1500 napos időszak első harmadában a csillag rotációs amplitúdója nagy, majd a középső időszakban az amplitúdó csökken, ami arra utal, hogy összességében kevesebb/kisebb folt lett a csillagon, azaz a felszín közeli mágneses tér összenergiája csökkent. Az észlelési időszak végére néhány rotációs ciklusnyi időre azután az amplitúdó újra megnőtt. Az **4. ábrán** a fénygörbén a kvázi-periódikus fényváltozás mellett megfigyelhetjük a hirtelen, tüskeszerű kifényesedésésként jelentkező flereket, köztük a legnagyobb szuperflereket.

Megvizsgálva a teljes időszakban megjelenő flerek és szuperflerek gyakoriságát és energiáját érdekes összefüggést találtunk: a flerek/szuperflerek átlagos gyakorisága és időátlagra vett összenergiája nagyobb volt, amikor több folt volt jelen a csillagon (végső soron tehát nagyobb volt a felszínen a mágneses energiasűrűség). Amikor pedig a foltok által lefedett összterület kisebb lett, a flerek időátlagra vett összenergiája is csökkent. Mindez egyfajta léptékbeli törvényszerűségekre utal: ha nagy a mágneses energiasűrűség, a flerek/szuperflerek formájában felszabaduló energia is nagyobb lesz. Ez a felszabaduló energia



4. ábra: A KIC 2852961 *Kepler* űrtávcső által mért fénygörbéje. A rotációs eredetű, kb. 35,5 napos fényváltozás mellett számos flert és szuperflert is megfigyelhetünk. Forrás: NASA Exoplanet Archive

azonban jelentkezhet több kisebb, egymást követő fler formájában, vagy akár egyetlen, nagyobb szuperflerként. Ezért van némi valószínűsége annak, hogy a fiatal, gyorsan forgó Naphoz képest jelenleg jóval alacsonyabb foltaktivitást mutató központi csillagunkon, ritkán ugyan, de mégis létrejöhet egy-egy szuperfler.

A cikk alapjául szolgáló kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal OTKA K131508 sz. pályázata, valamint az Osztrák-Magyar Akció Alapítvány (98öu5, 101öu13) támogatta.

## Hivatkozott cikkek

- Cliver, E.W., Dietrich, W.F. 2013, *Journal of Space Weather and Space Climate*, 3, A31  
 Ferreira, J. M. 1998, *Astronomy and Astrophysics*, 335, 248  
 Kővári, Zs., Strassmeier, K. G., Carroll, T. A., és mtsai. 2017, *Astronomy and Astrophysics*, 606, A42  
 Kővári, Zs., Oláh, K., Günther, M.N., és mtsai. 2020, *Astronomy and Astrophysics*, 641, A83  
 Lehtinen, J. J., Spada, F., Käpylä, M. J., Olsper, N., és Käpylä, P. J. 2020, *Nature Astronomy*, Vol. 4, p. 658-662  
 Maehara, H., Shibayama, T., Notsu, S., és mtsai. 2012, *Nature*, 485, 478  
 Notsu, Y., Maehara, H., Honda, S., és mtsai. 2019, *Astrophysical Journal*, 876, 58  
 Roettenbacher, R. M., Monnier, J. D., Korhonen, H., és mtsai. 2016, *Nature*, 533, 217  
 Rubenstein, E. P. és Schaefer, B. E. 2000, *Astrophysical Journal*, 529, 1031  
 Vida, K., Kővári, Zs., Pál, A., Oláh, K., és Kriskovics, L. 2017, *Astrophysical Journal*, 841, 124