

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Marian Karlický

Mohou na Slunci vzniknout supererupce?

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 59 (2014), No. 3, 187--193

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/144024>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2014

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



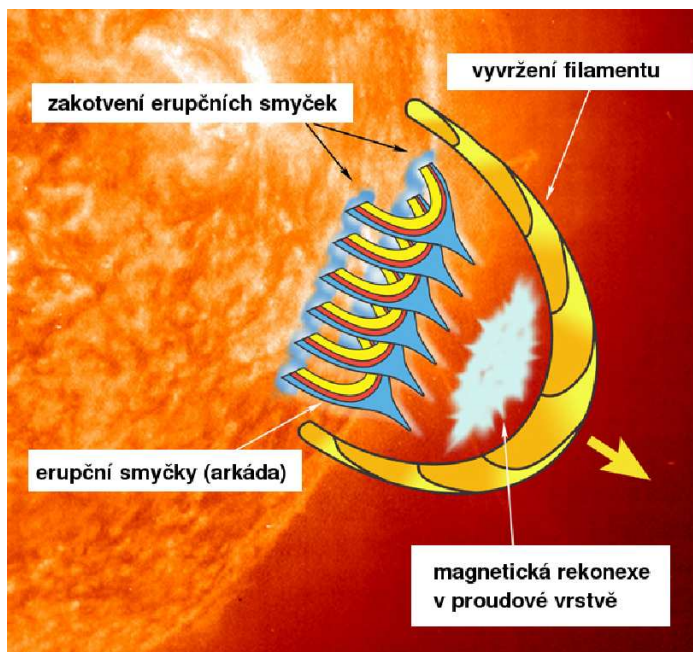
This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Mohou na Slunci vzniknout supererupce?

Marian Karlický, Ondřejov

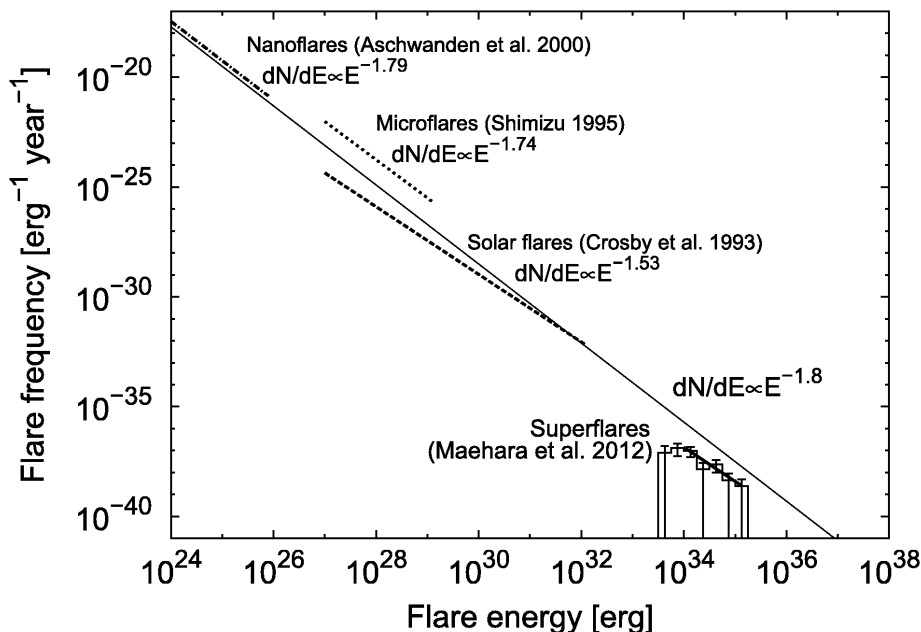
1. Úvod

Sluneční erupce je explozivní proces ve sluneční atmosféře, který vzniká rychlou přeměnou magnetické energie v okolí slunečních skvrn na ohřev a pohyby plazmatu, urychlování částic a záření v širokém oboru spektra od radiových vln přes optické, rentgenové až po gama záření [9], [3], [4]. Typické množství energie uvolněné v tomto procesu, trvajícím několik minut až několik hodin, je 10^{22} – 10^{25} J [7].



Obr. 1. Schéma modelu mohutné sluneční erupce podle P. Gallaghera (<http://solarmuri.ssl.berkeley.edu/~hhudson/cartoons>). Obrázek znázorňuje vyvržení filamentu, tj. magnetické smyčky, kterou teče elektrický proud až 10^{12} A. Pod ní se vytváří proudová vrstva, kde dochází k propojování magnetických siločár (rekonexi) se současným uvolňováním magnetické energie, tj. k primárnímu erupčnímu procesu. Ve spodní části erupce se vytváří arkáda erupčních smyček, jejichž zakotvení jsou pozorovatelná jako erupční vlákna. U nejmohtnějších erupcí jsou tato vlákna pozorovatelná i ve viditelném oboru spektra, viz také bílá vlákna na obrázku 5. Detailnější popis sluneční erupce lze najít v pracích [9], [3], [4].

Doc. RNDr. MARIAN KARLICKÝ, DrSc., Astronomický ústav, Akademie věd České republiky, 251 65 Ondřejov, e-mail: karlicky@asu.cas.cz



Obr. 2. Frekvence výskytu slunečních erupcí spolu s frekvencí výskytu stelárních supererupcí v závislosti na energii erupce (převzato z práce [10]). $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$

Schéma modelu sluneční erupce je znázorněno na obrázku 1. K erupcím podobného typu dochází i na hvězdách. V některých případech energie, uvolněná v těchto stelárních erupcích, podstatně převyšuje energii maximálních pozorovaných slunečních erupcí; dosahuje hodnot až 10^{26} – 10^{31} J [8]. K nejmohutnějším erupcím dochází zejména u mladých a dvojných hvězd. Tyto erupce, které jsou tisíckrát a vícekrát mohutnější než dosud pozorované nejmohutnější erupce na Slunci, se nazývají *supererupce*.

Z nedávné doby je znám případ mohutné sluneční erupce (intenzity X4.6 podle GOES klasifikace), která způsobila silnou geomagnetickou bouři ($\sim 540 \text{ nT}$) a vyřadila z provozu celou elektrickou síť v oblasti Quebec v Kanadě. Energie této erupce byla odhadnuta na 10^{25} J . Na základě této události se lze ptát, zdali nemůže dojít k ještě mohutnějším slunečním erupcím s ještě většími škodami na pozemském prostředí a zařízeních moderní civilizace.

Jak ukazuje obrázek 2, četnost výskytu slunečních erupcí N klesá s růstem jejich energie E podle mocninné závislosti $dN/dE \sim E^{-1.8}$. Například nejmohutnější sluneční erupce s energií 10^{25} J (tj. 10^{32} erg) se vyskytují přibližně jednou za rok.

Na základě tohoto grafu se dá i extrapolovat četnost výskytu možných slunečních supererupcí. Není však jasné, zda-li je taková extrapolace oprávněná. Na druhé straně, doplnit statistiku tohoto grafu o skutečná pozorování slunečních supererupcí je nereálné. Ve vesmíru je však mnoho hvězd podobného typu jako Slunce, a proto pozorování erupcí na těchto hvězdách je cestou k řešení tohoto problému.

2. Supererupce na hvězdách

Maehara a kol. [6] hledali erupce na hvězdách slunečního typu G hlavní posloupnosti v datech mise Kepler NASA [5], pozorovaných během 120 dnů v roce 2009. Pro výběr hvězd uvažovali efektivní teplotu T_{eff} v rozmezí 5100–6000 K a povrchovou gravitaci $\log(g) \geq 2$, kde g je v jednotkách m s^{-2} . V analýze více než 83 000 hvězd našli 365 supererupcí na 148 hvězdách slunečního typu G s energií větší než 10^{26} J. Typická délka supererupcí byla několik hodin a jejich amplituda byla 0.1–1 % hvězdné zářivosti. Chyba energií supererupcí byla odhadnuta na 60 %.

Příklad pozorování supererupcí na dvou hvězdách (KIC 9459362 a KIC 6034120) je na obrázku 3. Perioda variací světelné křivky hvězdy KIC 9459362 byla 12.5 dne a hvězdy KIC 6034120 5.7 dne. Obecně tyto variace mohou být způsobeny rotací hvězdy spolu s hvězdnými skvrnami, pohyby hvězd po eliptických drahách ve dvojném systému, zakrýváním jedné hvězdy druhou a nebo pulzací hvězdy. Všechny tyto možnosti musely být analyzovány.

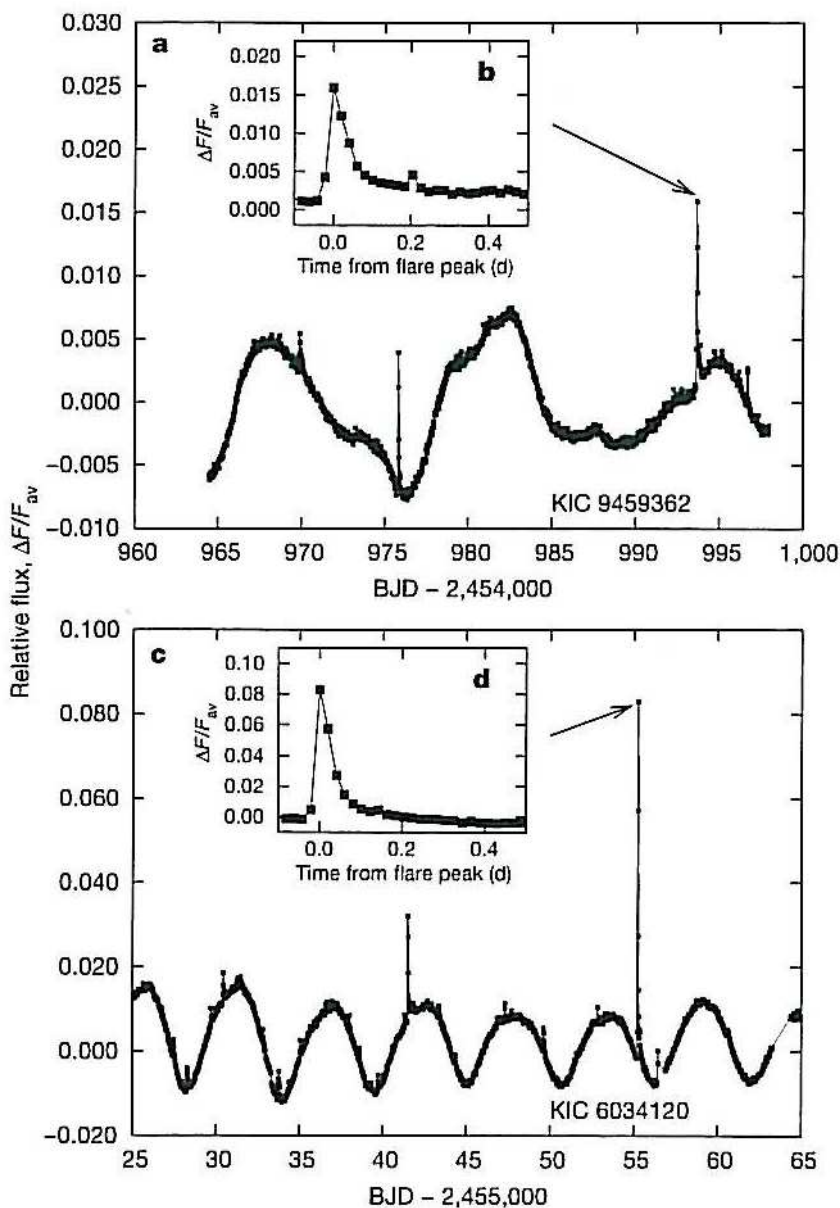
Bylo však zjištěno, že variace světelných křivek hvězd KIC 9459362 a KIC 6034120 jsou způsobeny rotací hvězdy se skvrnami. Objeví-li se totiž na disku hvězdy tmavá a chladná skvrna, zářivost hvězdy klesne. Tato zářivost opět vzroste, když skvrna při rotaci hvězdy zapadne za okraj hvězdy. Perioda této variace zářivosti proto odpovídá rotační periodě hvězdy. Hloubka modulace této variace je pak dána velikostí skvrny, což umožňuje odhadnout její velikost. Pokud dojde na hvězdě k erupci, vyzářená energie této erupce je pak superponována na základní rotační variaci světelné křivky tak, jak se ukazuje na obrázku 3. Z intenzity záření supererupce a vzdálenosti a parametru hvězdy se pak vypočítá celková energie supererupce.

Variace světelných křivek na obrázku 3 ukazují, že na hvězdách KIC 9459362 a KIC 6034120 došlo nejenom k supererupcím, ale že na těchto hvězdách existují veliké skvrny. V analogii s erupčními procesy na Slunci lze supererupce na těchto hvězdách vysvětlit uvolněním magnetické energie, naakumulované v blízkosti hvězdných skvrn.

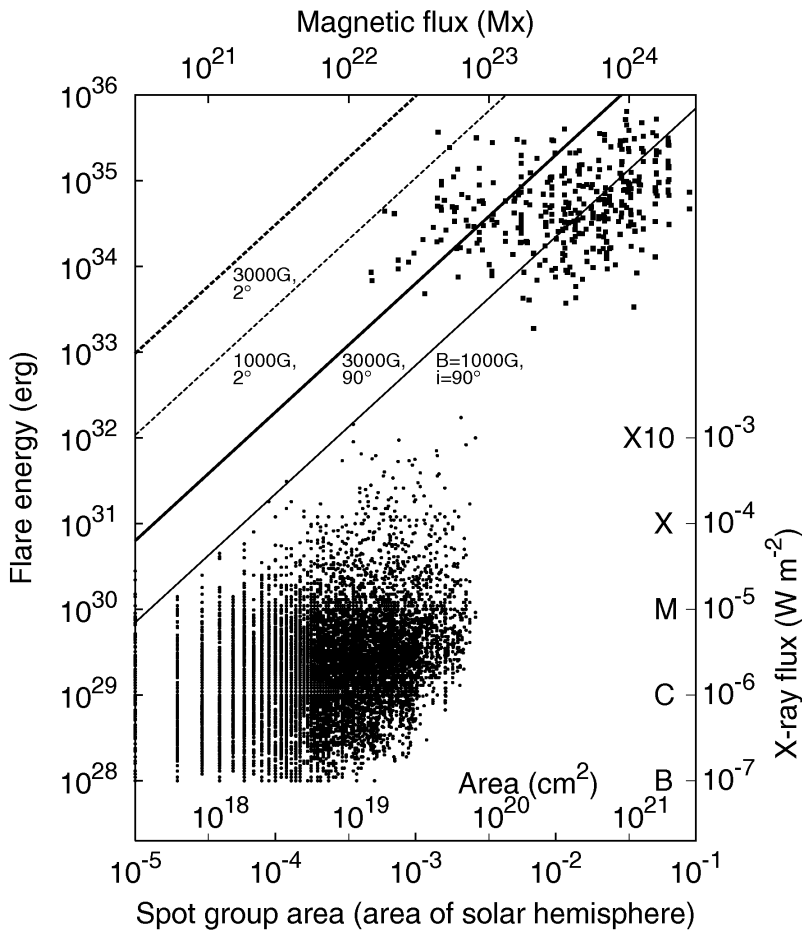
Data všech zjištěných supererupcí byla zpracována a výsledky jsou shrnuty v obrázcích 2 a 4. Obrázek 2 srovnává četnost výskytu hvězdných supererupcí (Maehara et al. [6]) a erupcí na Slunci. Histogram výskytu supererupcí v podstatě odpovídá extrapolované mocninné závislosti. Ukazuje se, že analyzované supererupce se vyskytují s četností jednou za 800 až 5000 let. Obrázek 4 pak ukazuje, že energie supererupcí roste s rostoucí velikostí hvězdných skvrn. Zdá se proto, že nutnou podmínkou supererupcí jsou neobvykle velké skvrny, které zaujímají plochu až 10^{-2} – 10^{-1} celkového povrchu hvězdy. Proto, pokud by mělo dojít k supererupci na Slunci, podmínkou jsou ohromné sluneční skvrny, viz obrázek 5. Za normálních okolností je i u těch zatím nejmohutnějších slunečních erupcí plocha skvrn podstatně menší, viz obrázek 4.

Dále Maehara a kol. [6] zjistili, že počet supererupcí je větší u hvězd, které mají kratší rotační periodu, tj. u hvězd podstatně mladších než je Slunce. To znamená, že v dalším studiu této problematiky bude nutné hledat supererupce na hvězdách typu G s pokud možno stejnou periodou rotace jako Slunce (střední hvězdná perioda rotace Slunce je 25.38 dní).

Všechna tato zjištění vedou k celé řadě teoretických otázek, zdali procesy na Slunci mohou skutečně vést ke vzniku sluneční supererupce. Například otázka: Je dynamo proces, který na Slunci generuje magnetické pole ve slunečních skvrnách dostatečný



Obr. 3. Typické světelné křivky hvězd se supererupcemi. (a) Světelná křivka se supererupcí na hvězdě G-typu KIC 9459362. BJD – barycentrické juliánské datum. (b) Zvětšená světelná křivka supererupce, d znamená dny od začátku supererupce. Odhadnutá energie supererupce je $5.63 \cdot 10^{27}$ J. (c) Stejně jako (a), ale pro supererupci na hvězdě G-typu KIC 6034120. (d) Stejně jako (b). Odhadnutá energie této supererupce je $3.03 \cdot 10^{28}$ J (převzato z práce [6]).

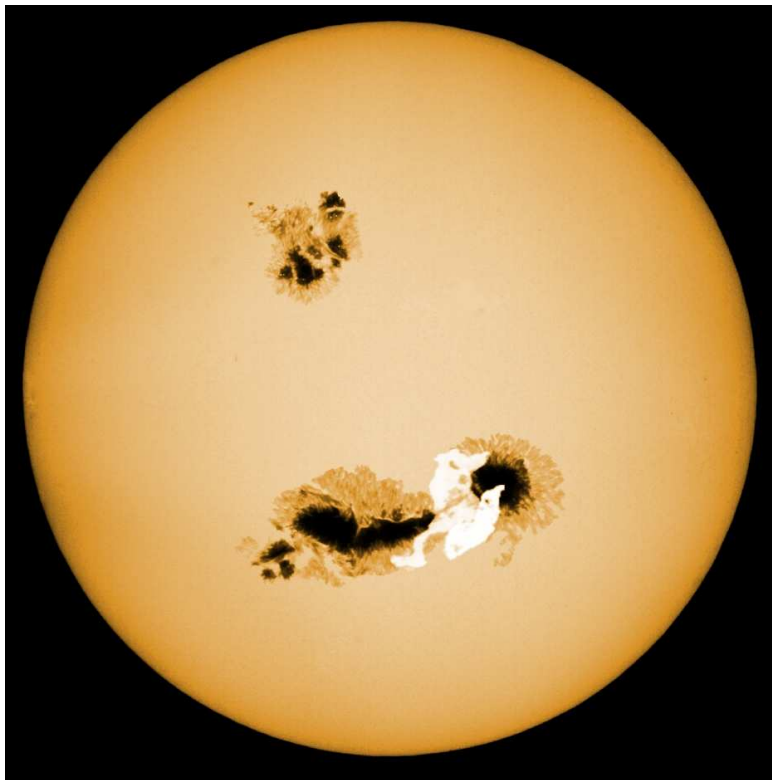


Obr. 4. Závislost energie erupce na ploše skvrn: plné čtverečky v obrázku nahoře jsou pro supererupce na hvězdách slunečního typu a plná kolečka dole pro sluneční erupce. Obrázek je doplněn rentgenovým (X) tokem pro případ slunečních erupcí a vypočtenými hodnotami magnetického pole a magnetického toku ve skvrnách na hvězdách (převzato z práce [10]). 1 maxwell (Mx) = 10^{-8} Wb

pro generaci vysokých magnetických polí a toků, nutných pro supererupci? Nebo: Jak dlouho by takový proces trval? Je pro supererupce nutná přítomnost horké planety velikosti Jupitera, jak je někdy diskutováno? Na tyto otázky se pokusili odpovědět ve své práci Shibata a kol. [10]. Autoři vyšli z Faradayovy indukční rovnice

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B}, \quad (1)$$

kde \mathbf{B} je vektor magnetické indukce, $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$, \mathbf{v} je rychlost proudění slunečního plazmatu a η je magnetická difuzivita. Při zanedbání efektu magnetické difuzivity ukázali, že potřebný magnetický tok pro supererupci (10^{16} Wb) lze vygenerovat asi



Obr. 5. Představa možné supererupce na Slunci (bílá vlákna), doprovázená skupinou neobvykle velkých slunečních skvrn, pozorovaná ve viditelném oboru spektra

za 40 let, což je doba delší než je sluneční cyklus (11 let), ale podstatně kratší než odhadovaný interval mezi supererupcemi. Zůstává ovšem otázka, nakolik může ovlivnit tento proces zesilování magnetického toku magnetická difuzivita. Autoři se zabývali také problémem role horkých planet velikosti Jupitera, ale jejich přítomnost v blízkosti studovaných hvězd se neprokázala.

3. Závěr

Na základě všech těchto výsledků nelze vyloučit vznik supererupcí s energiemi 10^{27} až 10^{28} J a jejich četnosti jednou za 800–5000 let i na našem Slunci. Pokud by k takové supererupci na Slunci došlo, lze zatím jen spekulovat, jaké katastrofální následky by taková supererupce mohla mít na podmínky života na Zemi. V první řadě by nejvíce byly ohroženy všechna elektrická a počítačová zařízení, elektrárny, elektrické a komunikační sítě, astronauti na oběžné dráze Země atd. Pokud by navíc došlo i k devastaci ozonové vrstvy Země, pak by vše bylo ohroženo nebezpečným zářením.

V těchto souvislostech vznikají i další otázky, například, zdali některé ještě větší supererupce, ke kterým mohlo dojít v minulosti na Slunci, nezpůsobily některé diskutované katastrofy v historii naší Země.

Tento článek je shrnutím výsledků prací prof. Kazunari Shibaty z Kyoto University, Japonsko, a jeho spolupracovníků. Tyto výsledky prof. Kazunari Shibata prezentoval na nedávné mezinárodní konferenci *Solar and stellar flares: Observations, simulations and synergies* konané v Praze 23–27. června 2014 i ve své přednášce pro veřejnost dne 26. června 2014 v budově Akademie věd ČR v Praze.

Poděkování. Autor děkuje prof. Kazunari Shibatovi za poskytnutí jeho článků a obrázků. Tato práce byla podpořena grantem P209/12/0103 GA ČR.

L i t e r a t u r a

- [1] ASCHWANDEN, M. J., TARBELL, T. D., NIGHTINGALE, R. W., SCHRIJVER, C. J., TITLE, A., KANKELBORG, C. C., MARTENS, P., WARREN, H. P.: *Time variability of the “quiet” Sun observed with TRACE, II. Physical parameters, temperature evolution, and energetics of extreme-ultraviolet nanoflares.* *Astrophys. J.* 535 (2000), 1047–1065.
- [2] CROSBY, N. B., ASCHWANDEN, M. J., DENNIS, B. R.: *Frequency distributions and correlations of solar X-ray flare parameters.* *Solar Phys.* 143 (1993), 275–299.
- [3] KARLICKÝ, M.: *Solar flares: Radio and X-ray signatures of magnetic reconnection processes.* *Res. Astronom. Astrophys.* 14 (7) (2014), 753–772.
- [4] KARLICKÝ, M., BÁRTA, M.: *Energetické kaskády v rekonexi magnetického pole.* *Vesmír* 92 (10) (2013), 558–561.
- [5] KOCH, D. G., et al.: *Kepler mission design, realized photometric performance, and early science.* *Astrophys. J.* 713 (2010), L79–L86.
- [6] MAEHARA, H., SHIBAYAMA, T., NOTSU, S., NOTSU, Y., NAGAO, T., KUSABA, S., HONDA, S., NOGAMI, D., SHIBATA, K.: *Superflares on solar-type stars.* *Nature* 485 (2012), 478–481.
- [7] PRIEST, E. R.: *Solar flare magnetohydrodynamics.* Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1981.
- [8] SCHAEFER, B. E.: *Flashes from normal stars.* *Astrophys. J.* 337 (1989), 927–933.
- [9] SHIBATA, K., MAGARA, T.: *Solar flares: Magnetohydrodynamic processes.* *Living Rev. Sol. Phys.* 8 (6) (2011), 1–99.
- [10] SHIBATA, K., ISOBE, H., HILLIER, A., CHOUDHURI, A. R., MAEHARA, H., ISHII, T., SHIBAYAMA, T., NOTSU, S., NOTSU, Y., NAGAO, T., HONDA, S., NOGAMI, D.: *Can superflares occur on our Sun?* *Publ. Astron. Soc. Japan* 65 (49), (2013), 1–8.
- [11] SHIMIZU, T.: *Energetics and occurrence rate of active-region transient brightenings and implications for the heating of the active-region corona.* *Publ. Astron. Soc. Japan* 47 (1995), 251–263.