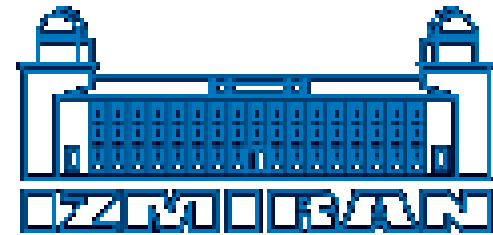


Расщепление спектров электронов и протонов при ускорении в солнечных вспышках

© 2022 *Leonty I. Miroshnichenko (IZMIRAN)*

**N.V. Pushkov Institute of Terrestrial
Magnetism, Ionosphere and Radio
Wave Propagation (IZMIRAN), Russian
Academy of Sciences (RAS)**

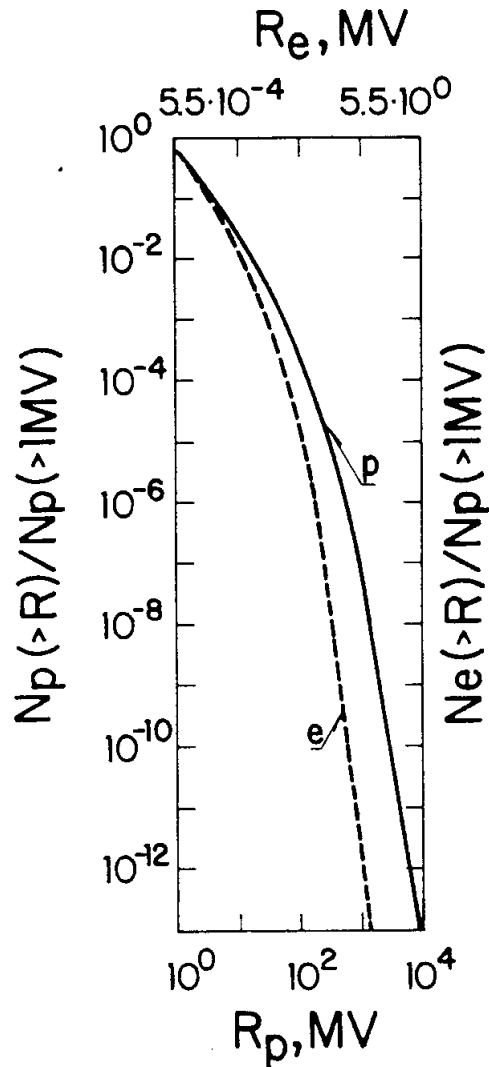


37-ая ВККЛ, Москва, МГУ, 27 июня - 2 июля 2022 г.

Аннотация

- **Вопрос об энергетике солнечных вспышек (или об относительном вкладе электронов и протонов), является одним из ключевых в физике вспышек. При этом многие специалисты склонны считать его решённым. Между тем, между физикой ускорения и энергетикой вспышек имеется ряд серьёзных «нестыковок», относящихся к самым ранним (начальным) стадиям ускорения. Для примера упомянем так называемое сдвиговое ускорение (см. доклад Мирошниченко и Стожкова на Секции ПК-1).**
- **С другой стороны, хорошо известно, что в процессе ускорения электронов и протонов (ионов) во вспышках их потери имеют существенно разную природу. Протоны теряют энергию на ионизацию и генерацию гамма-излучения при ядерных взаимодействиях с окружающим веществом, причём их спектры в источниках поддаются восстановлению. Электроны же, кроме ионизационных потерь, расходуют энергию на генерацию тормозного (рентгеновского) и синхротронного радиоизлучения. По этой причине, надо ожидать, что их спектры начнут «расщепляться», начиная с самых ранних стадий ускорения. При этом важно правильно выбрать наиболее удобный параметр для сравнения спектров, начиная с момента самого начала ускорения.**
- **Обосновывается гипотеза, учитывающая это различие, при условии, что оба сорта частиц начинают ускоряться одновременно и в одном и том же месте, т.е. рассмотрение ведётся в рамках определённой модели ускорения. Проблема сводится к тому, что наряду с восстановлением спектров протонов в источнике требуется проделать аналогичную работу для электронов. Однако прямых данных о спектрах электронов в межпланетном пространстве крайне мало, а восстановление их спектров в источниках сильно затруднено природой их энергетических потерь.**

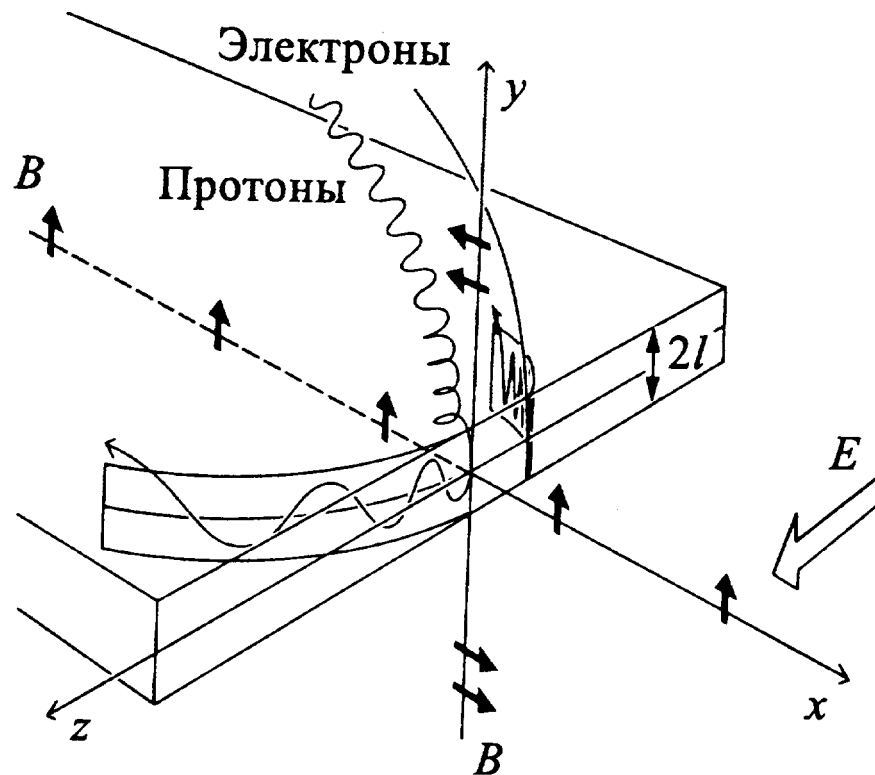
Expected differentiation



Expected differentiation of the normalized rigidity spectra of accelerated particles owing to different efficiency of acceleration mechanisms and different pattern of energy losses of electrons and protons (dashed and solid lines, respectively). A spectrum curve for protons is in approximate accordance with the observational data; a similar one for electrons illustrates an assumed steepening of their spectrum (Miroshnichenko, 1995).

Model in use

- Fig.2 from Spiser's paper (1965)



1. From my book_2001

- 1. A new approach to the problem under discussion was proposed by Miroshnichenko (1995) who suggested that the differences ("splitting") between proton (ions) and electron spectra are inevitable from the very beginning of the spectrum formation (if both these particle populations are accelerated in the same acceleration process).
- 2. Both populations start their acceleration simultaneously.
- 3. A convenient parameter would be a specific particle energy, *i.e.*, an energy per unit of mass.
- 4. It was suggested (Miroshnichenko, 1995) to analyze the spectral differentiation on the condition of normalization of $R(p) = 1838 \times R(e) \cong 1.0$ MV, *i.e.* starting with $V(p) \cong V(e)$.
- 5. From Equation $N_s(R) \sim Wf (+0.5-3.0)$, the real contribution of the number of accelerated protons or electrons to the energetics of flares may be evaluated. It depends considerably on the form of SCR spectrum in the source. Due to the selectivity of the acceleration mechanisms and different nature of energy losses of electrons and protons, their source spectra should be subject to softening at different rates nearly from the very beginning of the acceleration process.
- This results in a differentiation of the two spectra initially closely coupled by a common acceleration mechanism (Miroshnichenko, 1987, 1990). In this context, it is important to choose the most suitable parameter to compare the quantities of accelerated electrons and protons.

2. Foundation

In the light of well-known proton hypothesis of Simnett (1986), a convenient parameter would be a specific particle energy, *i.e.*, an energy per unit of mass. Obviously, the equality of specific energies is possible, provided the condition of $V(p) = V(e)$ holds. It follows that the momenta (or rigidities) of two particles will obey the ratio of their masses, $m(e)/m(p)$. Therefore, it was suggested (Miroshnichenko, 1995) to analyze the spectral differentiation on the condition of normalization of $R(p) = 1838 \times R(e) \cong 1.0$ MV, *i.e.* starting with $V(p) \cong V(e)$. A proton rigidity of 1 MV approximately corresponds to a thermal energy $E(p) \cong 10(+3)$ eV which would be the initial value for the acceleration of protons, for example, by a DC electric field.

3. Foundation

Obviously, evaluation of the source spectrum and energy losses of the electrons from data of the wave radiation signature, even for a narrow region of the spectrum, will depend heavily upon model ideas on loss conditions in the source and on mechanisms of emission. Nevertheless, there are good reasons for a possibility of such evaluations. In particular, observations near the Earth show that electron energy spectra from 30 keV to 3.0 MeV have a non-monotonous decreasing form (see, e.g., Kurt *et al.*, 1981), the number of relativistic electrons being several orders less than the number of relativistic protons in the same flare. Such a difference seems to be explainable by electron losses to synchrotron radiation, which under flare conditions falls into the ultra-violet range (Bulanov *et al.*, 1985). In connection with existing difficulties in interpreting of the electron component of solar cosmic rays, it appears to be reasonable to compile an Electron Source Spectrum Catalogue, similar to the Proton Source Spectrum Catalogue (Miroshnichenko *et al.*, 1999).

4. Foundation

Let us conclude this section by discussing briefly the acceleration of protons in the model of the RCS proposed by Litvinenko (1996). According to his finding, the magnetizing longitudinal field (see Figure 5.5) is proportional to the square root of the particle mass, being about 40 times larger for protons than for electrons. This gives an interesting consequence concern the composition of accelerated particles. For a small longitudinal field, the Speiser mechanism is applicable for both electrons and protons, these particle gaining the same speed in the RCS. Thus, the energy release mainly occurs in the form of protons with the energy about 0.1-1.0 MeV. Protons and electrons leave the RCS with the same speed almost parallel to the magnetic field. Thus, a neutral beam is created, traveling down the flare loops. Because the energy resides mainly in protons, they might be responsible for the chromospheric heating and flare X-ray emission. Experimental evidence and theoretical arguments in favour of the neutral beams were reviewed, e.g., by Martens and Young (1990)

5. Foundation

- **As the longitudinal magnetic field increases, one returns to the standard picture of acceleration, in which the electrons carry the bulk of particle energy. The model of Litvinenko (1996), therefore, relates the properties of accelerated particles to the structure of the reconnection region. This approach may be a step toward a unified description of particle acceleration in flares and may resolve the existing controversy between the proton and electron beam models (for more details see Litvinenko, 1996). Though this study focused on the electron acceleration, the RCS model also allows for the generation of neutral beams with energy primarily residing in protons. The relative efficiency of the two processes was found to be determined by the magnetic field structure inside the RCS. This approach might resolve the existing controversy between the electron and proton beam models (*cf.* Simnett, 1995).**

SPARK project_1

- Experimental Astronomy, 2021, P.1-26
<https://doi.org/10.1007/s10686-021-09798-6>

The high-energy Sun - probing the origins of particle acceleration on our nearest star

S. A Matthews¹ · H. A. S. Reid¹ · D. Baker¹ · D. S. Bloomfeld² ·
P. K. Browning³ · A. Calcines⁴ · G. Del Zanna⁵ · R. Erdelyi^{6,7,8} ·
L. Fletcher^{9,10} · I. G. Hannah⁹ · N. Jeffrey² · L. Klein¹¹ · S. Krucker¹² ·
E. Kontar⁹ · D. M. Long¹ · A. MacKinnon⁹ · G. Mann¹³ · M. Mathioudakis¹⁴ ·
R. Milligan¹⁴ · V. M. Nakariakov¹⁵ · M. Pesce-Rollins¹⁶ · A. Y. Shih¹⁷ ·
D. Smith¹⁸ · A. Veronig¹⁹ · N. Vilmer¹¹

SPARK project_2

- **Abstract. As a frequent and energetic particle accelerator, our Sun provides us with an excellent astrophysical laboratory for understanding the fundamental process of particle acceleration. The exploitation of radiative diagnostics from electrons has shown that acceleration operates on sub-second time scales in a complex magnetic environment, where direct electric fields, wave turbulence, and shock waves all must contribute, although precise details are severely lacking. Ions were assumed to be accelerated in a similar manner to electrons, but γ -ray imaging confirmed that emission sources are spatially separated from X-ray sources, suggesting distinctly different acceleration mechanisms. Current X-ray and γ -ray spectroscopy provide only a basic understanding of accelerated particle spectra and the total energy budgets are therefore poorly constrained.**

SPARK project_3

- **Additionally, the recent detection of relativistic ion signatures lasting many hours, without an electron counterpart, is an enigma. We propose a single platform to directly measure the physical conditions present in the energy release sites and the environment in which the particles propagate and deposit their energy. To address this fundamental issue, we set out a suite of dedicated instruments that will probe both electrons and ions simultaneously to observe; high (seconds) temporal resolution photon spectra (4 keV – 150 MeV) with simultaneous imaging (1 keV – 30 MeV), polarization measurements (5 – 1000 keV) and high spatial and temporal resolution imaging spectroscopy in the UV/EUV/SXR (soft X-ray) regimes. These instruments will observe the broad range of radiative signatures produced in the solar atmosphere by accelerated particles.**

SPARK project_4

- The following areas thus represent a continuing significant gap in our understanding of particle acceleration that require new approaches and instrumentation:
 - 1. The Sun as a laboratory for understanding particle acceleration.
 - **2. What is the transition between plasma heating and particle acceleration?**
 - **3. What are the processes responsible for ion acceleration, and what is their relationship to electron acceleration processes?**
 - 4. How and where are the most energetic particles accelerated on the Sun?
 - 5. What is the role of the magnetic field in determining the onset and evolution of particle acceleration, and what is the role of energy transport effects?
 - 6. γ -ray emission as a tracer of plasma composition?

Our approach

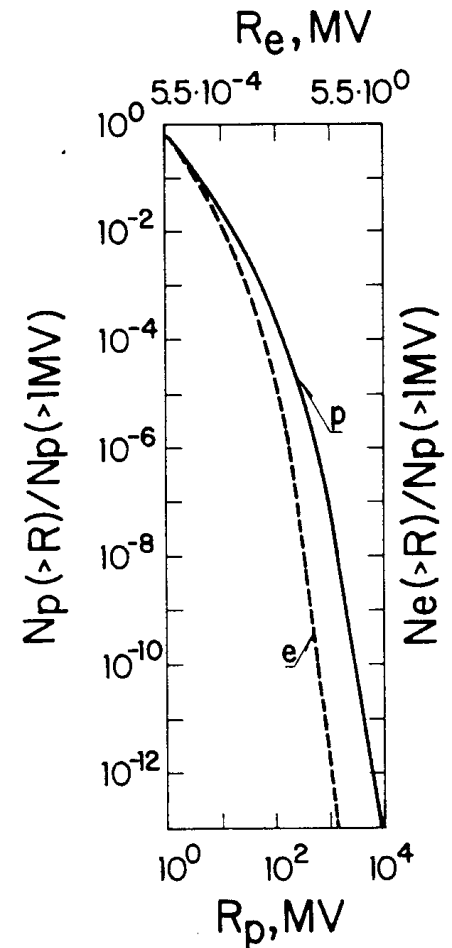
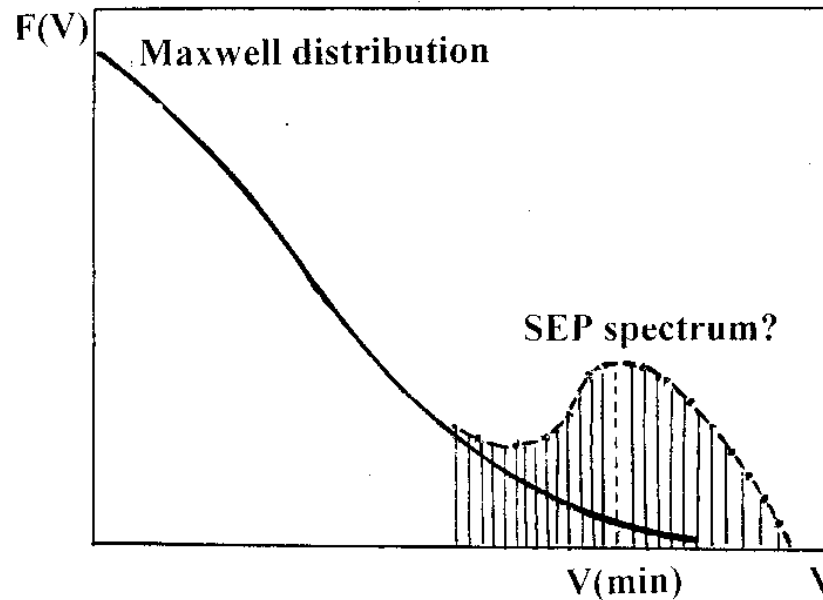
- В отличие от авторов проекта SPARK, которые предлагают новые измерения различных параметров вспышечного излучения с высокой точностью, мы предпочитаем полуэмпирический подход к проблеме ускорения частиц на Солнце, т.е. мы исходим, прежде всего, из данных наблюдений (слайд 2), с привлечением определённых (современных) модельных представлений о вспышечных процессах (слайд 3). В частности, мы исходим из того, что частицы всех видов (электроны, протоны и более тяжёлые ионы) начинают ускоряться **одновременно**. Какие есть основания для такого подхода?
- 1. Есть возможность из физики плазмы подобрать наиболее удобный параметр для сравнения спектров этих частиц. Таким параметром может быть удельная энергия частиц, т.е. энергия на единицу массы. A proton rigidity of 1 MV approximately corresponds to a thermal energy $E(p) \cong 10(+3)$ eV which would be the initial value for the acceleration of protons, for example, by a DC electric field. Именно с таких тепловых энергий начинают ускоряться протоны (см., например, книгу E. Priest and T. Forbes, и цитируемую там литературу.
- 2. Это различия в природе их потерь ускоряемых частиц. Особенно велика разница между электронами и протонами. Более тяжёлые ионы представляют отдельную проблему, и мы пока ограничим рассмотрение электронами и протонами.
- 3. При этом мы в значительной степени опираемся на опыт нашей работы, выполненной при подготовке фундаментального обзора Панасюк М. И., Мирошниченко Л. И. Ускорение частиц в космосе: универсальный механизм? – *Успехи Физических Наук*, 2022, т.192, №4, с.413-442.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.07.039022> - для русской версии,
<https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.07.039022> - для английской версии.

Глобальный и локальный уровни моделирования ускорения

- Физические процессы, контролирующие ускорение, лежат в промежутке (“interface”) между **глобальными и локальными явлениями**. Первая фаза ускорения частиц от теплового распределения наиболее интересна, так как именно она обеспечивает предварительную энергизацию (нагрев), инжекцию и по существу определяет зарядовый состав ускоряемых частиц. Эта стадия протекает на локальном уровне, когда важны лишь «микропроцессы» в солнечной плазме (e.g., Vlahos, 1989; Somov, 1992, 2006, 2012; Miroshnichenko, 1995; Miller et al., 1997).
- С другой стороны, чтобы ускориться до **релятивистских** энергий, сверхтепловые частицы нуждаются в **совершенно иных** пространственных масштабах, сравнимых, по крайней мере, с их гирорадиусами в корональных магнитных полях.
- В то же время, наблюдения показывают, что ускорение до релятивистских энергий осуществляется за время порядка 1 с для протонов и порядка нескольких секунд – для электронов (e.g., Miller et al., 1997). Современная теория пересоединения даёт ещё более короткие времена (Сомов и Орешина, 2011).
- Иными словами, **на начальной и заключительной стадиях** формирования спектра частиц мы имеем дело с **разными временными и пространственными масштабами** ускорения (e.g., Simnett, 1995).

Энергизация частиц в плазме

Энергизация
(нагрев)
плазмы на
хвосте
распределения
Максвелла:
**Первый этап в
ускорении
частиц.**
Проблема
инжекции.



Справа: Ожидаемое **расщепление спектров** ускоряемых солнечных частиц счет частиц за различной эффективности ускорительных механизмов и **различной природы энергетических потерь** электронов и протонов (пунктирная и сплошная кривые, соответственно) (Miroshnichenko, 1995).

Reference-1

- Agueda N. and D. Lario (2016) Release history and transport parameters of relativistic solar electrons inferred from near-the-Sun in situ observations. *Astrophys. J.*, 829:131 (11 pp), doi:10.3847/0004-637X/829/2/131.
- Aschwanden Markus J., Amir Caspi, Christina M. S. Cohen, Gordon Holman, Ju Jing, Matthieu Kretzschmar, Eduard P. Kontar, James M. McTiernan, Richard A. Mewaldt, Aidan O'Flannagain, Ian G. Richardson, Daniel Ryan, Harry P. Warren, and Yan Xu. Global Energetics of Solar Flares. V. Energy Closure in Flares and Coronal Mass Ejections. *The Astrophysical Journal*, 836:17 (17pp), 2017, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/836/1/17>
- Aschwanden Markus J., Amir Caspi, Christina M.S. Cohen, Gordon Holman, Ju Jing, Matthieu Kretzschmar, Eduard P. Kontar, James M. McTiernan, Richard A. Mewaldt, Aidan O'Flannagain, Ian G. Richardson, Daniel Ryan, Harry P. Warren, and Yan Xu. Global Energetics of Solar Flares and Coronal Mass Ejections. *Journal of Physics: Conference Series*, 20191332 (2019) 012002 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1332/1/012002.
- Chen Bin, Chengcai Shen, Dale E. Gary, Katharine K. Reeves, Gregory D. Fleishman, Sijie Yu, Fan Guo, Säm Krucker, Jun Lin, Gelu M. Nita and Xiangliang Kong. Measurement of magnetic field and relativistic electrons along a solar flare current sheet. *Nature Letters*, <https://doi.org/10.1038/s41550-020-1147-7>.
- E.I. Daibog, V.G. Kurt, Yu.I. Logachev, V.G. Stolpovsky (1986). Two types of electron events in solar flares. Eds.: V.E. Stepanov and V.N. Obridko. VNU Science Press, The Netherlands, pp.331-336.
- E.I. Daibog, E.A. Devicheva, S.V. Golenetskii, Yu.A. Gurian, V.G. Kurt, Yu.I. Logachev, A.V. Nogteva, V.G. Stolpovskii and A. Varga (1981). Energy spectra of high energy electrons and hard X-rays as observed onboard the space probe Venera 11 during the solar flare event of April 13, 1979. *Adv. Space Res.*, v.1, No.3, pp.73-76.
- Fleishman, Gregory D., Dale E. Gary, Bin Chen, Natsuha Kuroda, Sijie Yu, Gelu M. Nita. Decay of the coronal magnetic field can release sufficient energy to power a solar flare. *Science*, 2020, 367, 278–280.
- Kuznetsov Alexey A., and Gregory D. Fleishman. Ultimate Fast Gyrosynchrotron Codes The *Astrophysical Journal*, 2021, 922:103 (10pp), <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac29c0>.

References-2

- Bulanov, S.V., Kurnosova, L.V., Ogulchansky, Ya.Yu., Razorenov, L.A., and Fradkin, M.I.: 1985, Acceleration of ultrarelativistic electrons in solar flares, *Astronomy Letters Russia*, v.11, No.5, 383-389.
- Gómez-Herrero Raúl, Nina Dresing, Andreas Klassen, Bernd Heber, Manuela Temmer, Astrid Veronig, Radoslav Bučák, Miguel A. Hidalgo, Fernando Carcaboso, Juan J. Blanco, and David Lario. Sunward-propagating Solar Energetic Electrons inside Multiple Interplanetary Flux Ropes. *Astrophys. J.*, 840:85 (15pp), 2017 May 10, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa6c5c>.
- Kurt, V.G., Logachev, Yu.I., Stolpovsky, V.G., and Daibog, E.I.: 1981, Energetic solar particle spectra according to Venera-11, 12 and Prognoz-5, 6 observations, *Proc. 17th Int. Cosmic Ray Conf.*, Paris, France, v.3, 69-72.
- Sergei N. Kuznetsov, Victoria G. Kurt · Boris Y. Yushkov · Karel Kudela · Vladimir I. Galkin: 2011. Gamma-Ray and High-Energy-Neutron Measurements on CORONAS-F during the Solar Flare of 28 October 2003. *Solar Phys*, 268: 175–193, DOI 10.1007/s11207-010-9669-2.
- Litvinenko, Yu.E.: 1996, Particle acceleration in reconnecting current sheet with a nonzero magnetic field, *Astrophys. J.*, v.462, 997-1004.
- Matthews, S.A., H.A.S. Reid, D. Baker, D.S. Bloomfield, P.K. Browning, A. Calcines, G. Del Zanna, R. Erdelyi, L. Fletcher, I.G. Hannah, N. Jeffrey, L. Klein, S. Krucker, E. Kontar, D.M. Long, A. MacKinnon, G. Mann, M. Mathioudakis, R. Milligan, V.M. Nakariakov, M. Pesce-Rollins, A.Y. Shih, D. Smith, A. Veronig, N. Vilmer. The high-energy Sun - probing the origins of particle acceleration on our nearest star. *Experimental Astronomy*, 2021, P.1-26 <https://doi.org/10.1007/s10686-021-09798-6>
- Martens, P.C.H. and Young, A.: 1990, Neutral beams in two-ribbon flares and in the geomagnetic tail, *Astrophys. J. Suppl.*, v.73, No.2, 333-342.

References-3

- Miroshnichenko, L.I.: 1987, Dynamics and energetics of accelerated particles in solar flares, In: *Solar Flares*, Ed.: I.S. Shcherbina-Samoilova, Moscow, VINITI, v.34, 238-277.
- Miroshnichenko, L.I.: 1990, *Dynamics and Prediction of Radiation Characteristics of Solar Cosmic Rays*, Doctoral Dissertation, Moscow, IZMIRAN, p.326.
- Miroshnichenko, L.I.: 1995, On the threshold effect of proton acceleration in solar flares, *Solar Phys.*, v.156, No.1, 119-129.
- Miroshnichenko, L.I., Mendoza, B., and Perez-Enriquez, R.: 1999, Energy spectra of accelerated solar protons from different sources: I. Reconstruction and properties of the source spectrum, *Solar Phys.*, v.186, No.1-2, 381-400.
- Панасюк М. И., Мирошниченко Л. И. Ускорение частиц в космосе: универсальный механизм? – Принят к публикации в *УФН* 17 июля 2021 г. Предположительно выйдет в свет в апреле-мае-июне 2022, т.192, №5-6, <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.07.039022> - для русской версии, <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.07.039022> - для английской версии.
- Priest E, Forbes T (2000) *Magnetic Field Reconnection (MHD Theory and Applications)*. Cambridge University Press, p 520.
- Simnett, G.M.: 1986, A dominant role for protons at the onset of solar flares, *Solar Phys.*, 106, 165-183.
- Simnett, G.M.: 1995, Protons in flares, *Space Sci. Rev.*, v.73, 387-432.
- Speiser, T.W. : 1965, Particle trajectories in model current sheets, *J. Geophys. Res.*, v.70, No.17, 4219- 4226.

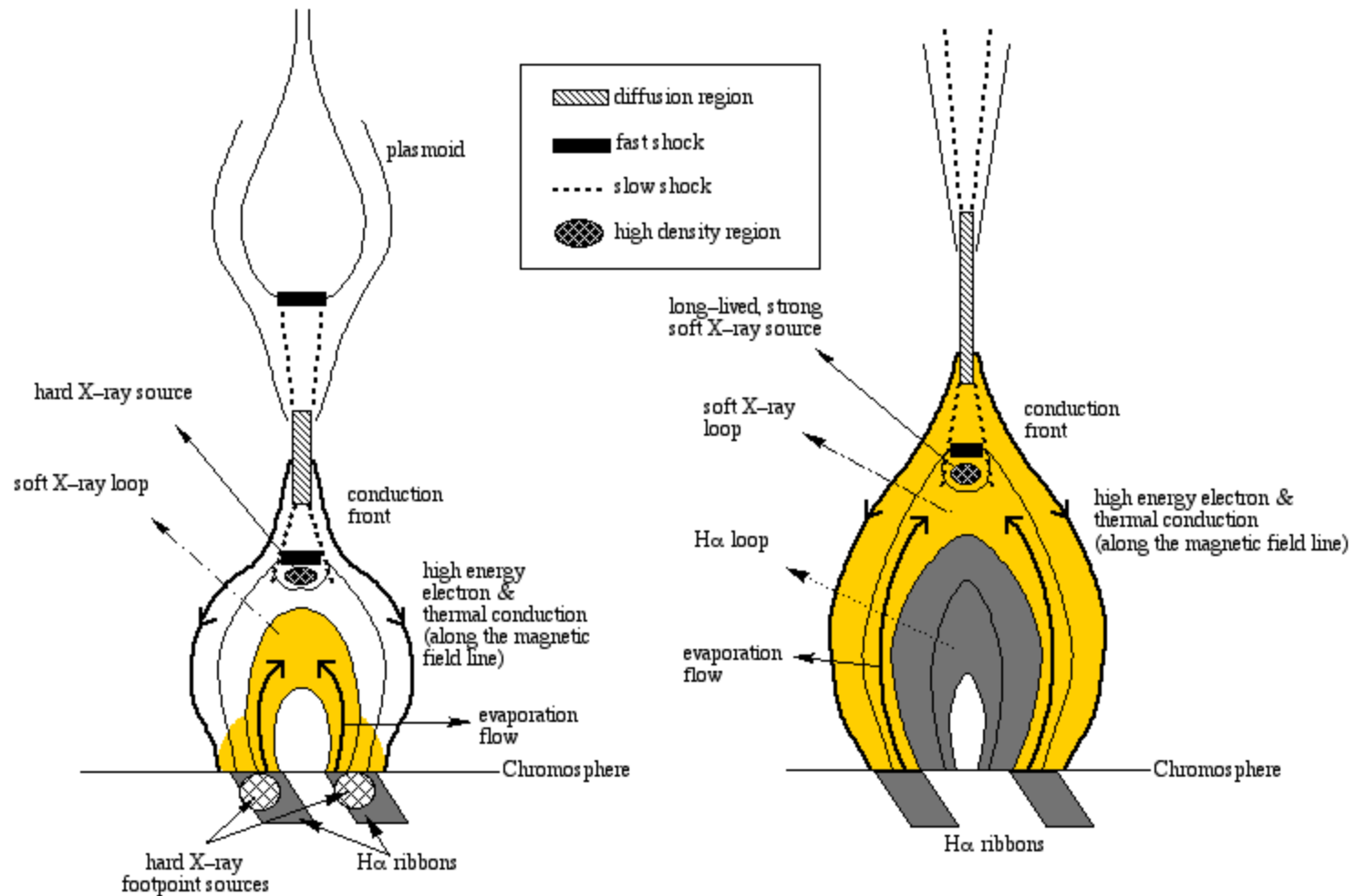
References-4

- Сыроватский С.И., Шмелева О.П. Нагрев плазмы быстрыми электронами и нетепловое рентгеновское излучение при солнечных вспышках.- *Астрон. журн.*, 1972, т.49, с.334-347.
 - М.И. Панасюк, Л.И. Мирошниченко. Ускорение частиц в космосе: Универсальный механизм? – *Успехи физических наук*, 2022, т.192, №4, с.413-442.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.07.039022> - для русской версии,
<https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.07.039022> - для английской версии.
 - Brown, J.C. The deduction of energy spectra of non-thermal electrons in flares from the observed dynamic spectra of hard X-ray bursts. *Solar Physics*, 1971, 18, No.3, 489-502.
 - Brown, J.C. The directivity and polarization of thick target X-ray bremsstrahlung from solar flares. *Solar Physics*, 1972, 26, No.2, 441-459.
 - Brown, J.C. Thick target X-ray bremsstrahlung from partially ionised targets in solar flares. *Solar Physics* 28 (1973) 151-158.
 - [V.I. Kiselev](#), [N.S. Meshalkina](#) & [V.V. Grechnev](#) (2022) Relationships Between the Spectra of Near-Earth Proton Enhancements, Hard X-Ray Bursts, and CME Speeds. *[Solar Physics](#)* volume 297, Article number: 53 (2022).
 - Лысенко А.Л. (Кандидатская Диссертация). (2020). Импульсное ускорение заряженных частиц в солнечных вспышках и их роль в нагреве плазмы. ИКИ РАН, Автореферат, 23 с.
- Моторина Г.Г. Динамика нагрева плазмы и энергетических распределений ускоренных электронов во время солнечных вспышек по данным рентгеновского и ультрафиолетового излучения. CD, 2017.

Методические подходы

- 1. Анализ данных наблюдений: можно ли по данным одной вспышки (спектр электронов и X-излучения) восстановить спектр электронов в источнике?
- 2. Эксперимент
- 3. Моделирование

CSHKP model



Impulsive flares (or impulsive phase)

LDE flares (or gradual phase)

CSHKP

- The CSHKP acronym refers to four key theoretical papers that appeared over the time frame 1964 - 1976: [Carmichael](#), [Sturrock](#), [Hirayama](#), and [Kopp & Pneuman](#). It might be easy to imagine that nothing new has happened since then, except for minor tweaks, judging from the Archive contents!

Prospects

Cristina M.S. Cohen (2003):

- **“Problem of particle acceleration does not die...”**

Thank you!

- ***Contact information:***
- **Dr. Leonty I. Miroshnichenko**
- **Department of Physics of the Sun and Solar-Terrestrial Relations**
- **N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (IZMIRAN),**
- **Russian Academy of Sciences (RAS),**
<http://www.izmiran.ru>
- **Kaluzhskoye Shausse, 4, Troitsk, Moscow, 108840,**
- **RUSSIA**
- **Phone: 007-495-8510282; Fax: 007-495-8510124**
- **E-mail: leonty@izmiran.ru**

Acknowledgements

- Автор признателен V.G. Kurt, V.G. Yanke, участникам семинара в отделе КЛ ИЗМИРАН 4 апреля 2022 г., - всем, кто участвовал в подготовке данного РРТ и обсуждении работы.

Artist illustration of a coronal mass ejection. Image credit: NASA/MSFC



**Fundamental
Problem:
Flare-CME,
Physical
and/or
Topological
Links**