



ЭРУПТИВНЫЕ ВСПЫШКИ КАК ИСТОЧНИК СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Алексей Струминский

*ИКИ РАН, Россия, Москва,
astrum@iki.rssi.ru*

Проблема происхождения СКЛ затрагивает фундаментальные вопросы солнечной физики:

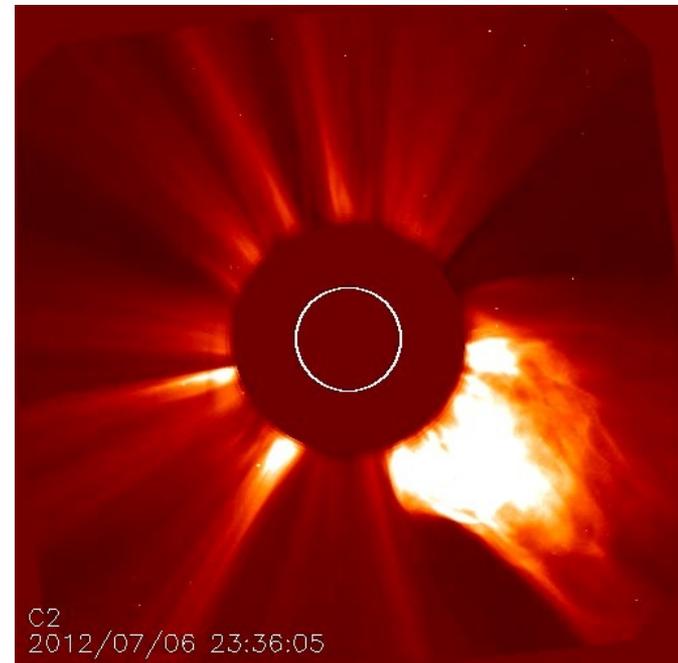
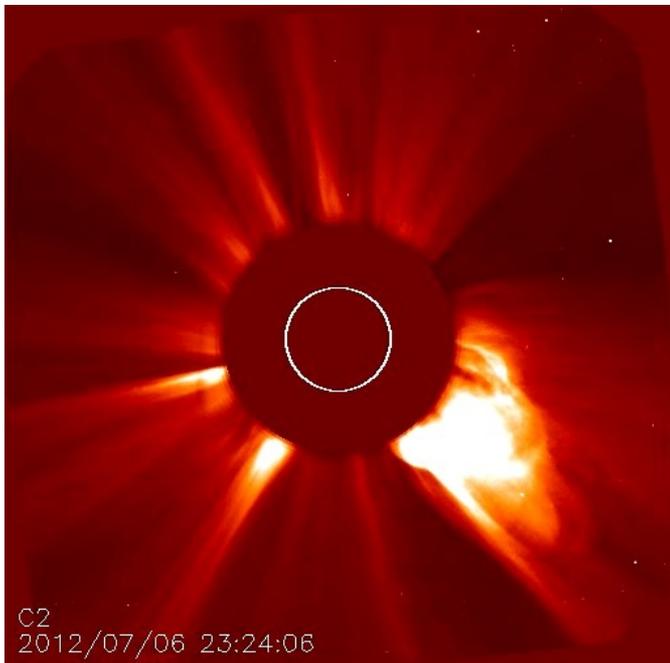
- взаимосвязь вспышек и корональных выбросов массы (КВМ);
- существование двух классов вспышек – ограниченных по высоте (confined) и не ограниченных по высоте (эруптивных);
- ускорение электронов и протонов в двух фазах вспышек - импульсной и постепенной;
- генерацию длительного солнечного гамма >100 МэВ излучения.

Классификация вспышек

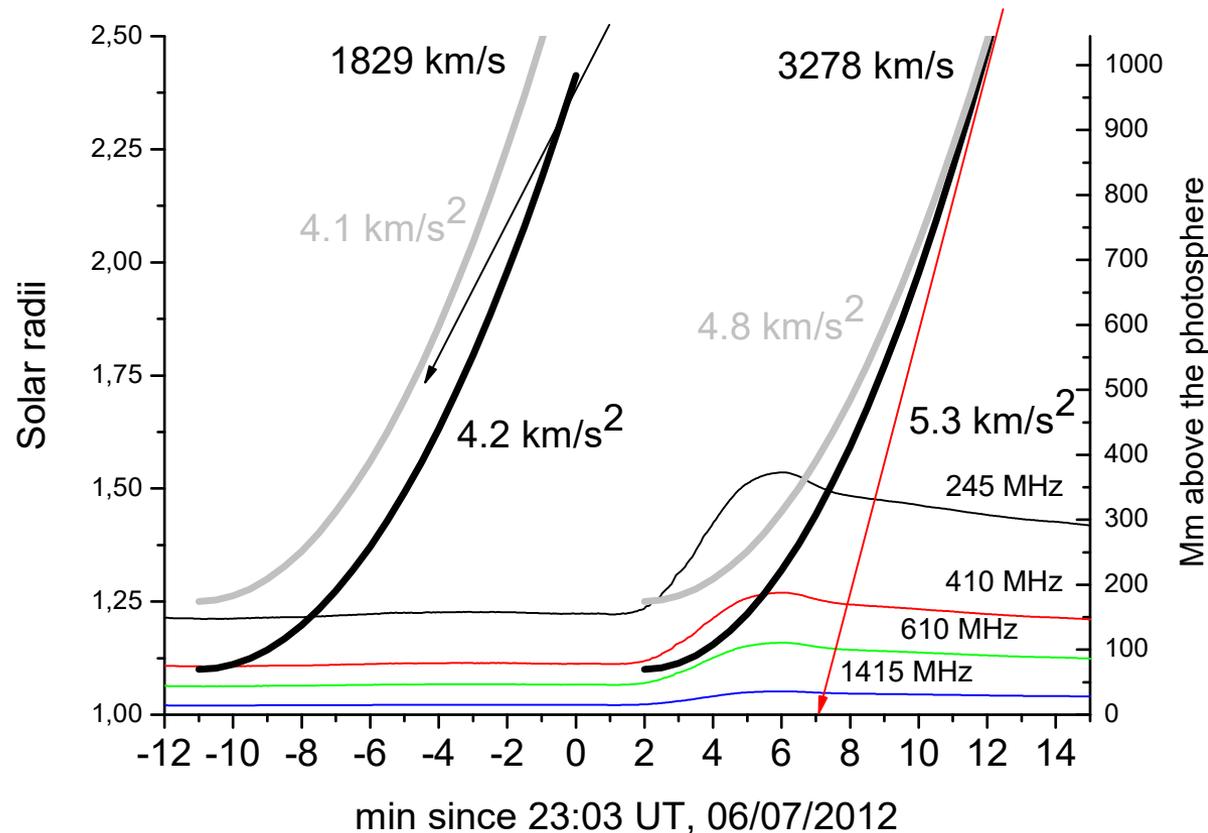
- Švestka (1986), развивая идеи Pallavicini et al. (1977), предложил разделять вспышки на две группы - 1) ограниченные (confined) и 2) эруптивные (eruptive).
- Под термином «eruptive flare» Švestka (1986) подразумевал все события, приводящие к открытию силовых линий независимо от наличия или отсутствия эффектов в хромосфере, а «confined» - все остальные. «confined»-»eruptive» различаются величиной магнитного поля вовлеченного в процесс.
- На диаграмме (Cliver et al. 2019) вспышки: 1) эруптивные без хромосферных эффектов; 2) эруптивные с хромосферными эффектами и 3) ограниченные (Struminsky et al, 2020; Grigorieva&Struminsky, 2021).
- Количественными характеристиками хромосферных эффектов являются dT/dt и dEM/dt плазмы SXR (Струминский и др., 2021; Григорьева и Струминский, 2022)
- $J_{SXR} = f(T) * EM$, $EM \sim n^2 V$

Корональные выбросы массы

- Это эрупции коронального вещества выше в корону или межпланетное пространство
- Наиболее известный коронограф *LASCO*, работает практически непрерывно с 1997 года, обновляющаяся база данных
- По наблюдениям *LASCO* можно делать оценки скорости, ускорения КВМ, исследовать связь вспышек и КВМ
- Делает снимки короны каждые 12 мин в поле зрения 1.5-30Rs, ниже два последовательных кадра 06.07.2012 23:24 UT, 23:36 UT



Ускорение КВМ в эруптивных вспышках

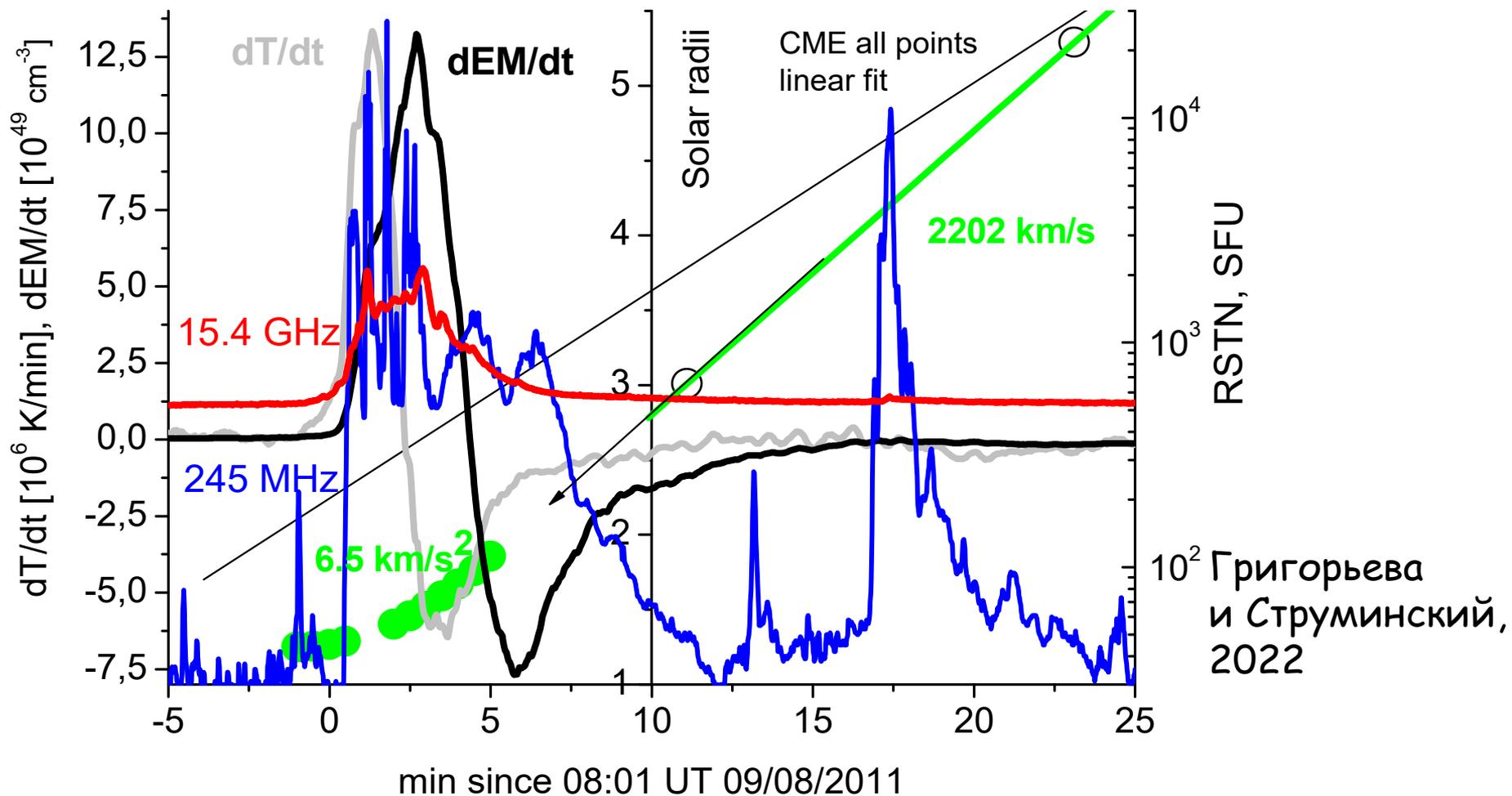


Плазменное
зеркало

$$\nu[\text{Hz}] \approx 9000\sqrt{n[\text{cm}^{-3}]}$$

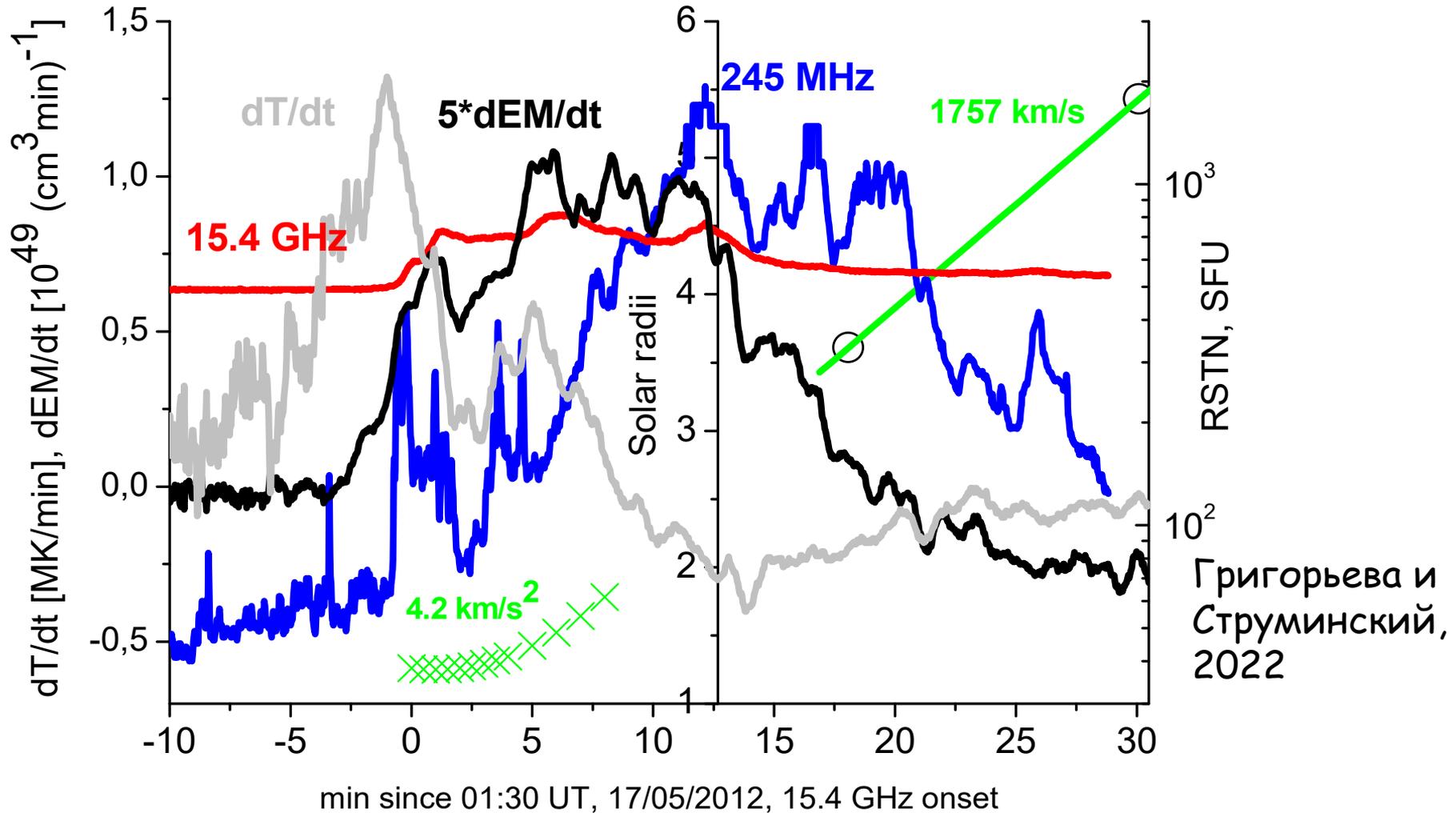
Учет динамики КВМ в течение первых 30-40 мин после вспышки (LASCO C2) позволяет уточнить оценки a и t ; исследовать взаимозависимость вспышек и КВМ

Эруптивные вспышки с сильными хромосферными эффектами и мощными СТС



Наблюдается радиоизлучение на частотах ниже и выше 1415 МГц ,
 вспышка развивается на высотах как менее, так и более 50 Мм.

Эруптивные вспышки со слабыми хромосферными эффектами и мощными СТС

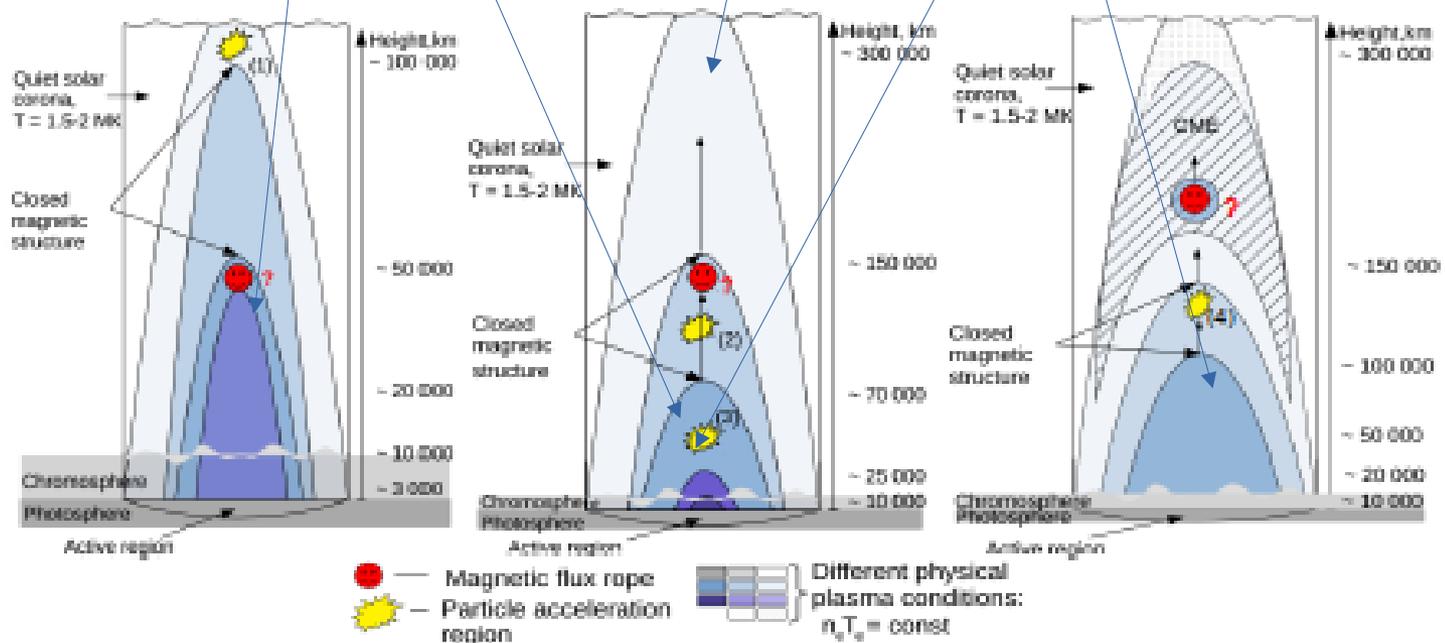


Григорьева и
Струминский,
2022

Наблюдается радиоизлучение на частотах ниже и выше 1415 МГц, гиросинхротронное излучение относительно слабое, высоты более 50 Мм.

Выводы 1

- Солнечная вспышка является длительным процессом расхода магнитной энергии, запасенной в активной области на высотах до ~ 0.5 радиусов Солнца.
- При высотах менее ~ 0.1 радиуса Солнца силы магнитного поля хватает для удержания нагревающейся плазмы, и происходят вспышки, ограниченные по высоте, с ярко выраженными хромосферными эффектами в импульсной фазе.
- Эруптивные вспышки же реализуются при высотах более ~ 0.1 радиуса Солнца, когда силы магнитного поля недостаточно для удержания плазмы. Происходит эрупция, в предельном случае сверхзвуковой КВМ (магнитная детонация).
- Эруптивные вспышки могут, как сопровождаться эффектами в хромосфере, так и нет.





Multiple Sources of Solar High-energy Protons

Leon Kocharov^{1,2} , Nicola Omodei³ , Alexander Mishev^{1,2} , Melissa Pesce-Rollins⁴ , Francesco Longo^{5,6} , Sijie Yu⁷ , Dale E. Gary⁷ , Rami Vainio⁸ , and Ilya Usoskin^{1,2} 

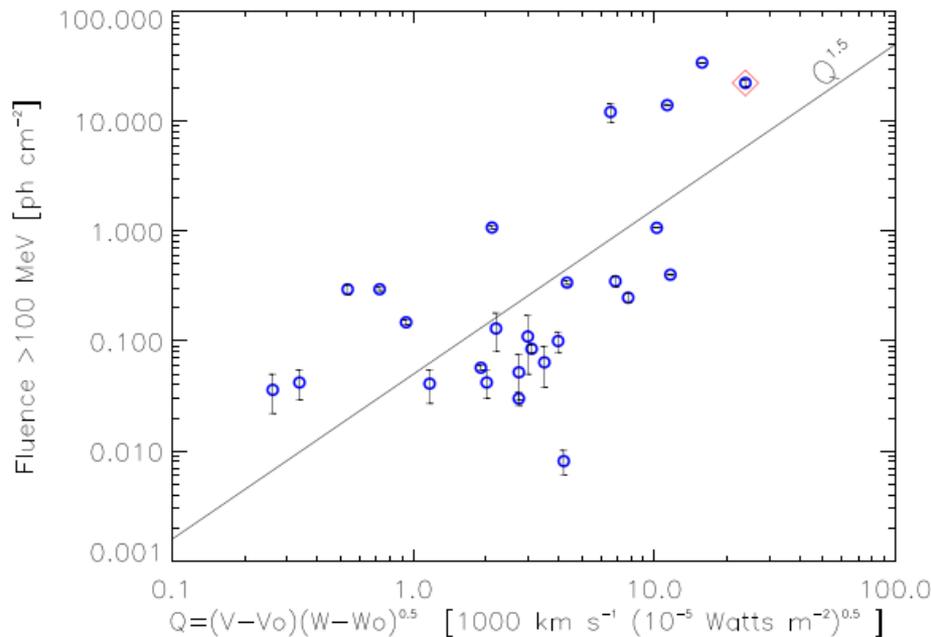


Figure 5. Scatter plot of the >100 MeV γ -ray fluence of the delayed-type γ -ray flares vs. the product of associated CME velocity and square root of the X-ray flare magnitude. Adopted threshold values are: the Solar and Heliospheric Observatory/LASCO CME speed $V_0 = 500$ km s $^{-1}$ and the GOES flare class M2.0 ($W_0 = 2 \times 10^{-5}$ W m $^{-2}$). The red diamond specifies the 2017 September 10 eruption.

Figure 5 shows a scatter plot of the >100 MeV γ -ray fluence of delayed events versus the combined flare–CME parameter

$$Q = (V - V_0)(W - W_0)^{0.5}, \quad (2)$$

where W is the soft X-ray flare magnitude, V is the LASCO CME speed, and V_0 and W_0 are empirical threshold values, which are $V_0 = 500$ km s $^{-1}$ and $W_0 = 2 \times 10^{-5}$ W m $^{-2}$. We find a good correlation between the flare–CME parameter Q and the γ -ray fluence of delayed events, with the correlation coefficient $r(Q, F) = 0.77^{+0.07}_{-0.10}$. It is higher than the correlation coefficient between the γ -ray fluence and the CME speed, $(V, F) = 0.60^{+0.11}_{-0.15}$, or the correlation coefficient between the fluence and the soft X-ray flare magnitude, $(W, F) = 0.61^{+0.11}_{-0.15}$. **This supports the idea that the delayed high-energy γ -ray emission is the result of flare–CME synergy.**

Compared to most solar particle events, GLEs and prolonged **100 MeV γ -ray events are extreme, in terms of the (sub) relativistic proton number, and associated with major but not outstanding flares and CMEs, so a scenario of such events could include a synergy of flares and CMEs.** There were

Две фазы ускорения частиц

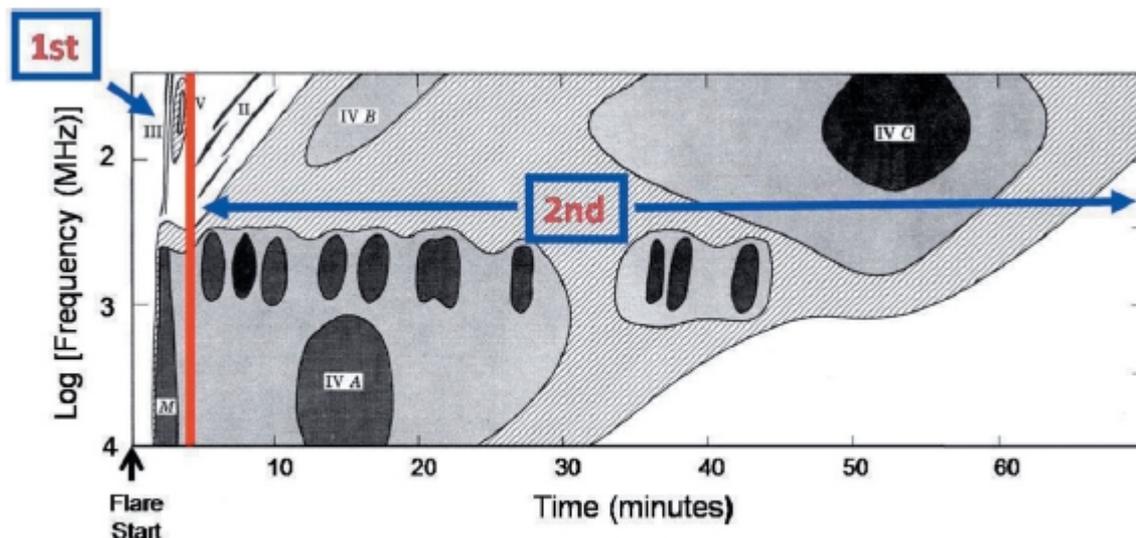


Figure 3. A fully-developed radio burst with the first (impulsive) and second (shock-associated) phases separated by the red vertical line. In the vast majority of flares, only the first phase occurs (after Wild, Smerd, and Weiss, 1963).

Universal Heliophysical Processes
Proceedings IAU Symposium No. 257, 2008
N. Gopalswamy & D.F. Webb, eds.

© 2009 International Astronomical Union
doi:10.1017/S1743921309029639

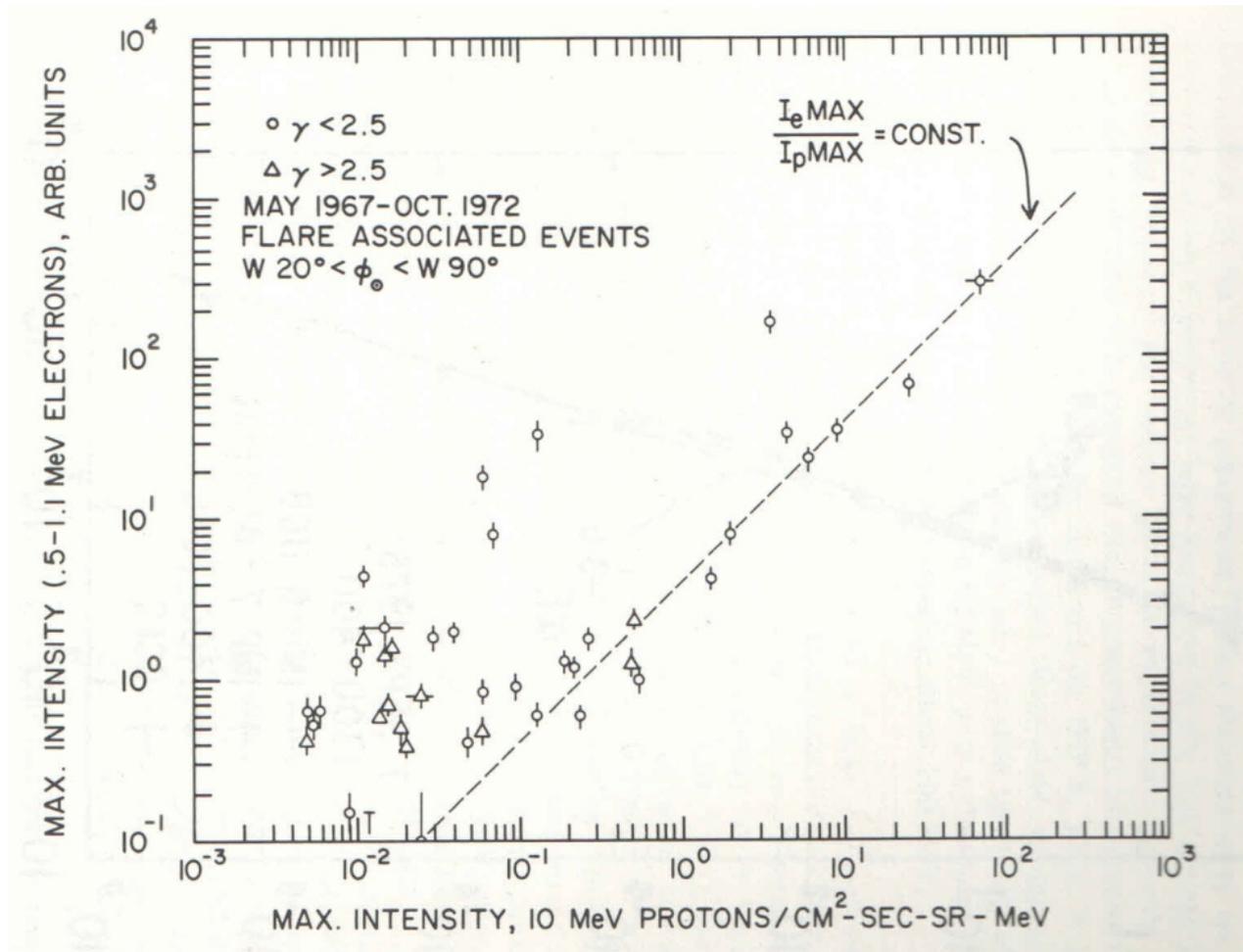
History of research on solar energetic
particle (SEP) events:
the evolving paradigm

Edward W. Cliver¹

Wild J.P., Smerd S.F., Weiss A.A. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*
1963. V. 1. P. 291.

СКЛ и три типа солнечных радиовсплесков (III, II, IV)

Два механизма и два класса SEP событий



- Солнечные протоны и электроны, измерения на IMP-4 (Ramaty et al., 1978) - два механизма ускорения.

Максимальная энергия, стохастическое ускорение

The rate of energy loss of an electron with kinetic energy E_k in magnetic field H is under the approximation of a circular trajectory (Takakura and Kai, 1966)

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = v_H \left(\frac{1}{2} \varepsilon^2 + \varepsilon \right), \quad (1)$$

where $\varepsilon = E_k/mc^2$ and $v_H = 3.85 \times 10^{-9} H^2 \text{ sec}^{-1}$. On the other hand, the gain in energy due to the acceleration process can be written as

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\varepsilon}{\tau_a}, \quad (2)$$

where τ_a is the characteristic acceleration time. Clearly the acceleration process only can give rise to particles with energy $> \varepsilon$ if their supply exceeds the losses, i.e. if

$$\tau_a < 2 v_H^{-1} (\varepsilon + 1)^{-1}. \quad (3)$$

TABLE III
Values of the high-energy cutoff

H	$D = 1 \text{ min}$	2 min	3 min	5 min
500 G	87 MeV	40 MeV	25 MeV	14 MeV
1000 G	18 MeV	8 MeV	4.7 MeV	2.2 MeV

Thus, one can expect a cutoff-like behaviour of the spectrum at energies of the order of 1 or 10 MeV, depending on the speed of the acceleration process, and electrons of higher energies could significantly participate in the bremsstrahlung only if the acceleration time from 4 keV to $> 10 \text{ MeV}$ were shorter than 1 min. The rise

Время ускорения

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 300:L95–L98, 1986 January 15
© 1986. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

RAPID ACCELERATION OF ENERGETIC PARTICLES IN THE 1982 FEBRUARY 8 SOLAR FLARE

S. R. KANE¹

Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley

E. L. CHUPP AND D. J. FORREST

University of New Hampshire, Department of Physics

G. H. SHARE

E. O. Hulburt Center for Space Research, Naval Research Laboratory

AND

E. RIEGER

Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, Institut für extraterrestrische Physik

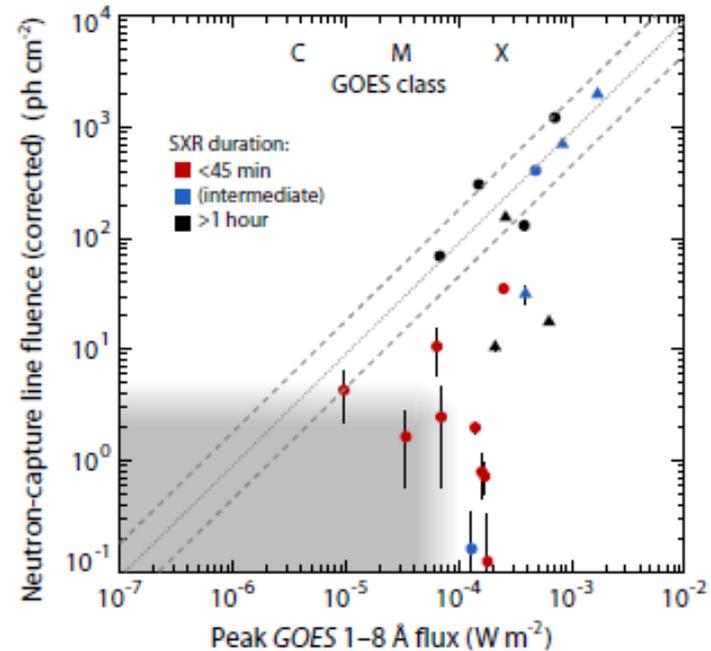
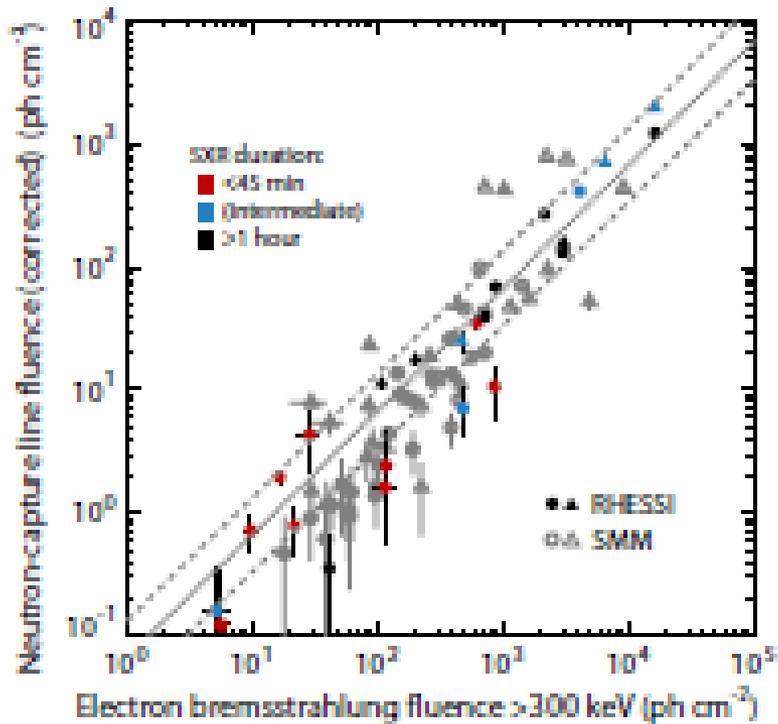
Received 1985 July 1; accepted 1985 October 18

ABSTRACT

Hard X-ray and gamma-ray measurements of the 1982 February 8 (~ 1250 UT) solar flare made with spectrometers aboard the *ISEE 3* and *SMM* spacecraft show that bursts of photons from ~ 40 keV to ~ 40 MeV are coincident to within ± 1 s. This indicates that the acceleration of particles to relativistic velocities can occur promptly (within ~ 1 s). As far as the energetic particles interacting at the Sun are concerned, the “two-phase” process, which requires several minutes for particle acceleration to relativistic velocities, cannot account for the present gamma-ray observations. Even the “two-step” acceleration process, which is assumed to occur in a small magnetic loop, is severely constrained by the present observations.

Subject headings: particle acceleration — Sun: flares

Два механизма ускорения (Shih et al., 2009)



Первый механизм производит пропорциональные количества релятивистских электронов и ионов. Второй механизм производит в основном субрелятивистские электроны. Роль релятивистских эффектов?



First Fermi-LAT Solar Flare Catalog

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL SUPPLEMENT SERIES, 252:13 (31pp), 2021 February

Ajello et al.

Abstract

We present the first Fermi-Large Area Telescope (LAT) solar flare catalog covering the 24th solar cycle. This catalog contains 45 Fermi-LAT solar flares (FLSFs) with emission in the γ -ray energy band (30 MeV–10 GeV) detected with a significance of $\geq 5\sigma$ over the years 2010–2018. A subsample containing 37 of these flares exhibits delayed emission beyond the prompt-impulsive hard X-ray phase, with 21 flares showing delayed emission lasting more than two hours. No prompt-impulsive emission is detected in four of these flares. We also present in this catalog observations of GeV emission from three flares originating from active regions located behind the limb of the visible solar disk. We report the lightcurves, spectra, best proton index, and localization (when possible) for all FLSFs. The γ -ray spectra are consistent with the decay of pions produced by >300 MeV protons. This work contains the largest sample of high-energy γ -ray flares ever reported and provides a unique opportunity to perform population studies on the different phases of the flare and thus allowing a new window in solar physics to be opened.

Unified Astronomy Thesaurus concepts: Solar flares (1496); Solar gamma-ray emission (1497); Gamma-ray sources (633); Gamma-ray telescopes (634); Catalogs (205)

2. All of the FLSFs with LLE prompt emission (produced by >300 MeV ions) reach their peak within seconds of the 100–300 keV emission peak (produced by >100 keV electrons) observed with Fermi-GBM, implying that these ions and electrons are accelerated, transported, and interact with the ambient medium at the same time. Similar conclusions for the acceleration of lower-energy (1–30 MeV) ions were reached by Chupp (1987) and Hurford et al. (2006) based on the RHESSI imaging of the 2.223 MeV neutron-capture γ -ray line, and by Shih et al. (2009) who reported a tight correlation between the 2.223 MeV line fluence and the >300 keV electron bremsstrahlung fluence.

These similarities between gradual SEPs and >60 MeV gradual-delayed emission, plus the observed drifting of the centroid of γ -ray emission from the original active region, which is accentuated by the observations of BTL flares, indicate that the site and mechanism of the acceleration of ions responsible for the long-duration γ rays is different from that of particles producing the impulsive nonthermal flare radiation and suggest that long-duration γ rays are another radiative signature of acceleration in CME shocks. However, unlike the

Выводы 2

- Там, где происходит изменение магнитного потока, возникает электрическое поле, ускоряющее заряженные частицы. В условиях вспышек напряженность такого поля больше, чем в поле Драйзера, возникают убегающие электроны.
- Без учета потерь на излучение максимальная энергия электронов ограничивается длительностью ускорения, наличием необходимой длины ускорения.
- При учете потерь на излучение максимальная энергия электронов ~ 10 МэВ ограничивается потерями (темпом набора энергии).
- По всей видимости, протонам для достижения порога генерации гамма-линий (>10 МэВ) будет необходимо уже несколько минут. Такое время может быть достигнуто в результате действия множества элементарных актов, то есть вследствие стохастического ускорения.
- В первой (импульсной) фазе ускорения видно излучение только нетепловых электронов, а во второй (постепенной) - наблюдаются свидетельства ускорения протонов.

ВЫБОР МЕХАНИЗМА УСКОРЕНИЯ

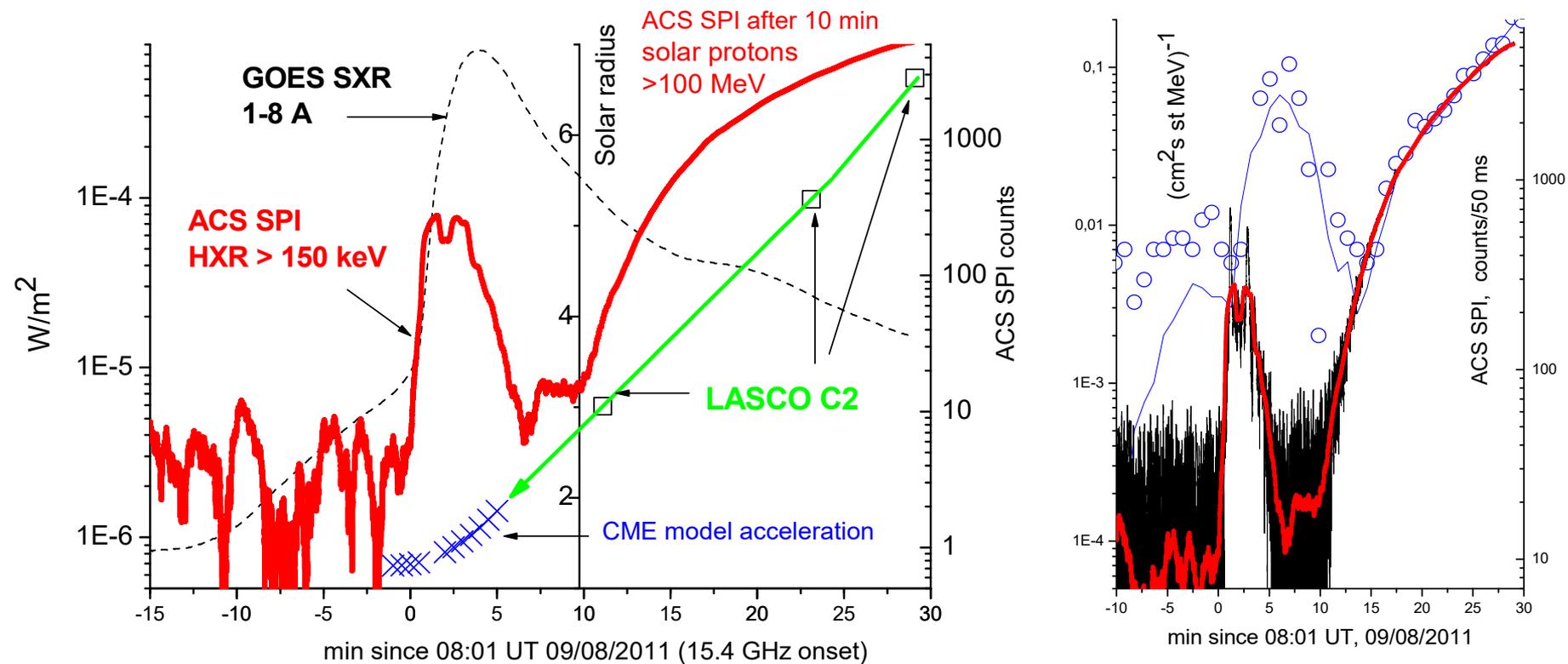
Таблица 1. Механизмы ускорения, рассматриваемые в обзоре (Miller et al. 1997) и возможность ускорения в них электронов и протонов.

Observations	Sub-Dreicer E	Super-Dreicer E	MHD Turbulence	Shocks
~100 keV electrons	yes	yes	yes	Yes
~10 MeV electrons	no	?	yes	?
~100 MeV protons	no	?	yes	Yes

Выводы 3

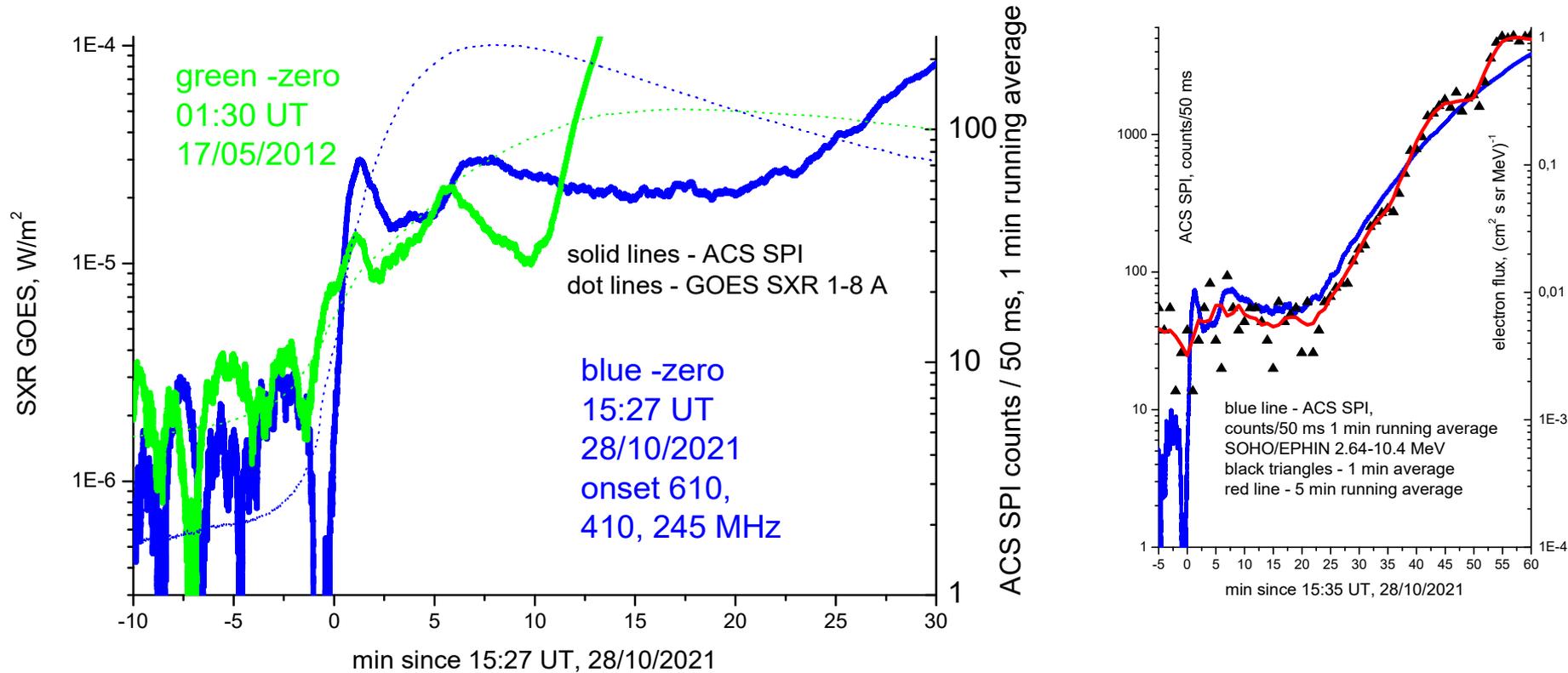
- Так как для ускорения КВМ до сверхзвуковой скорости необходимо время, сопоставимое со временем ускорения протонов до ~ 100 МэВ, то существует дилемма, ускоряются ли протоны непосредственно во вспышках, или на ударном фронте КВМ.
- На сегодня невозможно отождествить электроны ~ 10 МэВ на Солнце, единственная возможность - измерения в межпланетном пространстве.

Солнечные протоны и электроны в эруптивных вспышках с сильными эффектами в хромосфере



09.08.2011, X6.8 08:01 UT

Солнечные протоны и электроны в эруптивных вспышках со слабыми эффектами в хромосфере



- Распространение СКЛ, устный доклад Григорьева и др., ВККЛ2022
- GLE 73, 28/10/2021 постер Струминского и др., ВККЛ2022

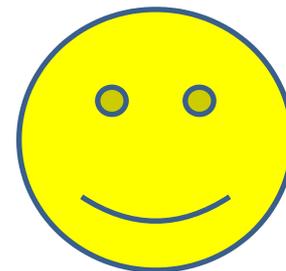
Заключительный вывод

- Совместный анализ данных по возрастаниям интенсивности солнечных электронов и протонов после эруптивных вспышек, как с сильным, так и слабым электромагнитным излучением, позволяет утверждать:
- Электроны >1 МэВ и протоны >100 МэВ ускоряются стохастически на фоне ускорения КВМ
- Магнитная детонация - a synergy of flares and CME
- Удержание протонов за фронтом КВМ приводит к длительному гамма-излучению.

Две составляющих эруптивных
вспышек — замкнутые петли и КВМ

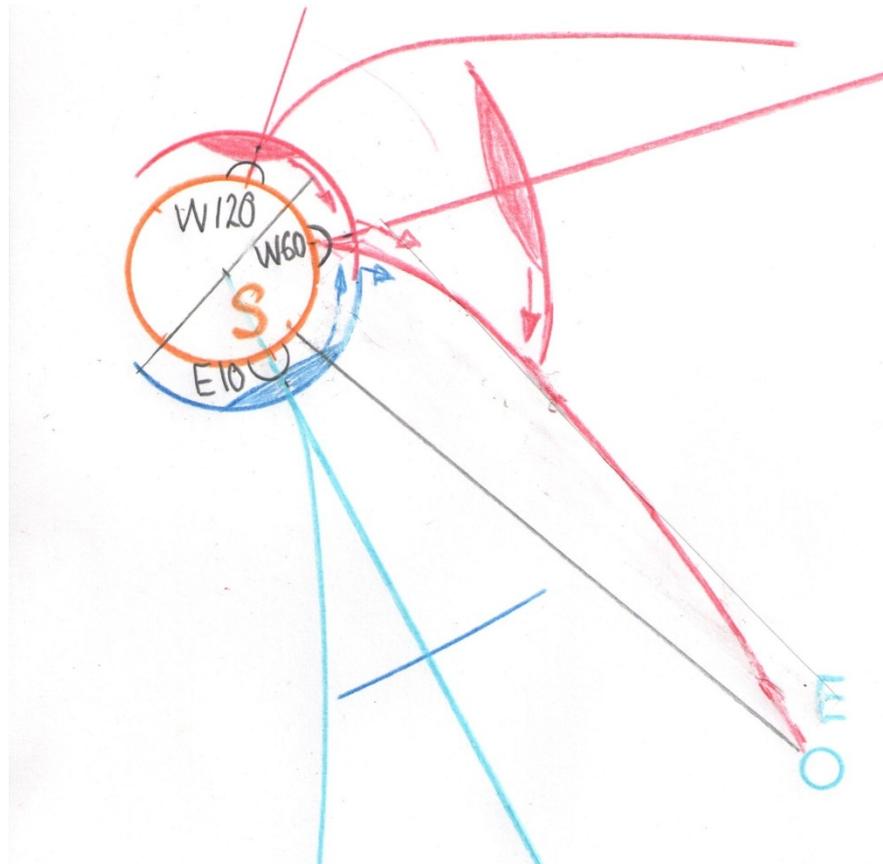


Спасибо за
внимание!



СКЛ - определения

- Протоны
- 30 МэВ - 20 ГэВ
- v/c 0.25 - 0.99
-
- Электроны
- 30 кэВ - 10 МэВ
- v/c 0.32 - 0.99



Минимальная длина распространения 1.2 а.е.
Время задержки относительно ЭМИ
Протоны 38 мин - <2 мин

Вспышки и солнечные протонные события (СПТС)

- Диаграмм (Cliver et al. 2019) иллюстрирует соотношение между параметрами СПТС и родительских вспышек при благоприятном магнитном соединении с наблюдателем.
- Три группы вспышек:
 - 1) со слабым ЭМИ (исчезновение волокна), быстрыми КВМ, большими потоками протонов.
 - 2) с сильным ЭМИ, быстрыми КВМ и большими потоками протонов (главная последовательность, синдром «большой вспышки»)
 - 3) без СПТС и КВМ (>618 км/с);

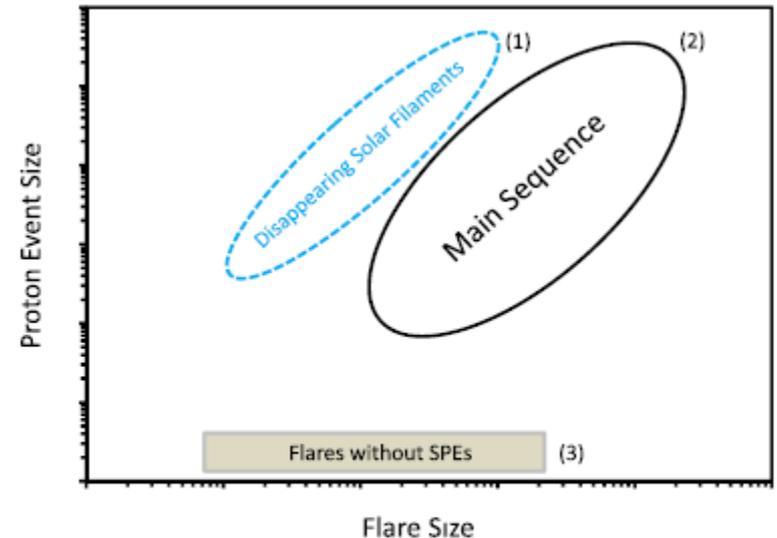


Figure 17. Schematic comparison of SPE vs. flare size parameters for large, well-connected SPEs showing three characteristic zones of events: (1) DSF-associated SPEs, (2) main sequence of SPEs associated with big flares and strong shocks, and (3) non-SPE events with either no or slow associated CMEs.

(Cliver et al., 2019)

Кинематические оценки

В поле зрения коронографа LASCO C2 ($1.5-6R_{\text{Sun}}$) скорости КВМ, которые сопровождаются ускорением протонов >500 МэВ,
 $V = 1500-3000$ км/с.

Эти значения задают ускорение

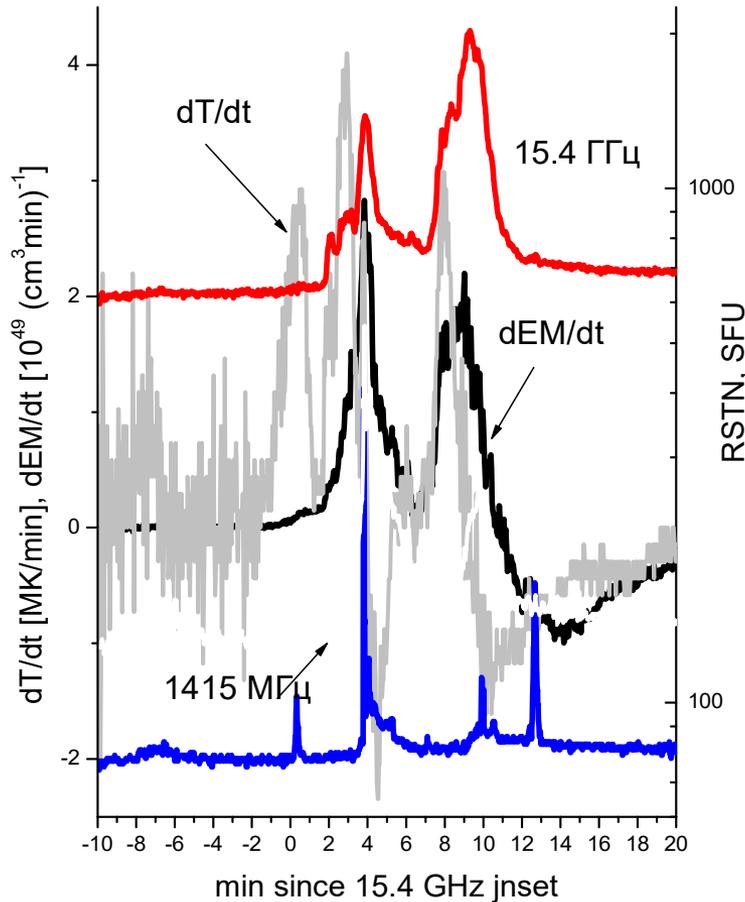
$$a = V^2 / 2d \sim 3-13 \text{ км/с}^2$$

$$(d = 0.5R_{\text{Sun}} \text{ до C2})$$

и его длительности

$$\tau = V / a \sim 500-240 \text{ с.}$$

Ограниченные (confined) вспышки без КВМ и СТС



- Время между максимумом T и максимумом EM менее двух минут
- Радиоизлучение на частотах ниже 1415 МГц не наблюдается, следовательно, возникает ограничение по высоте < 50 Мм.
- При таких высотах нет места для ускорения КВМ!
- Пример -06.09.2017, X2/2 0900 UT

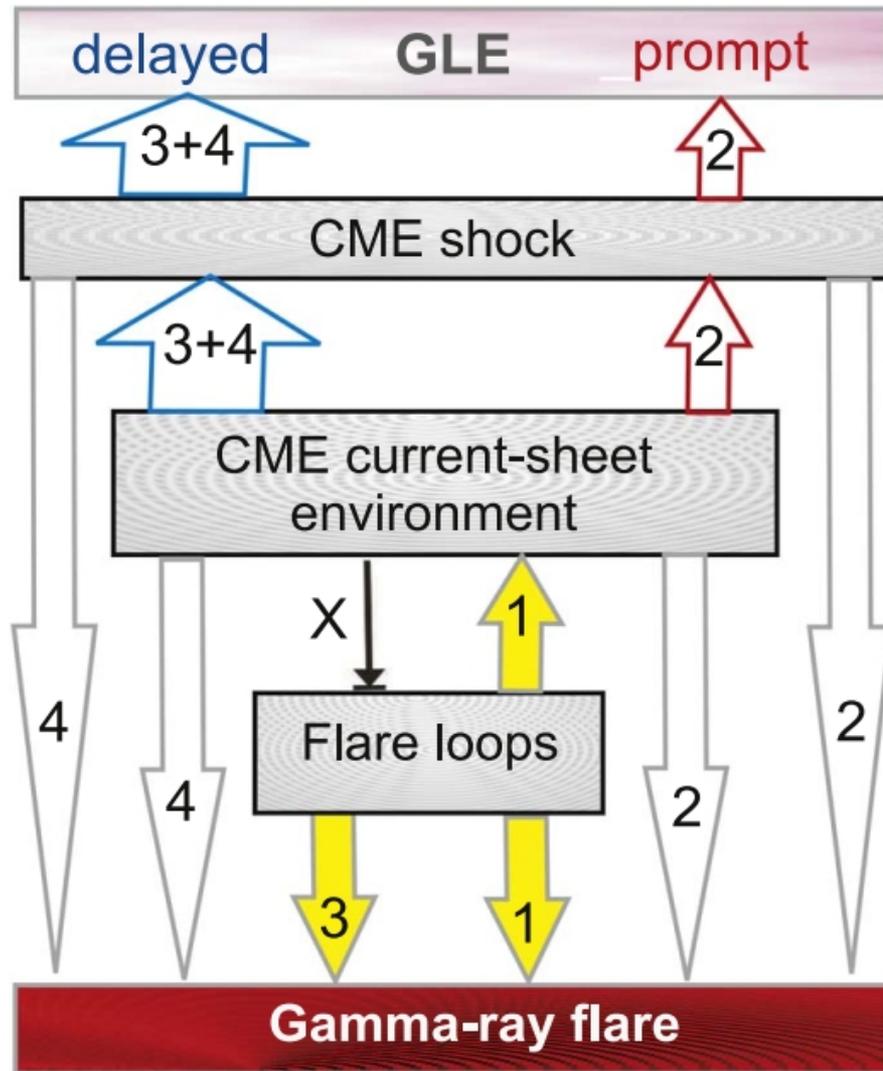
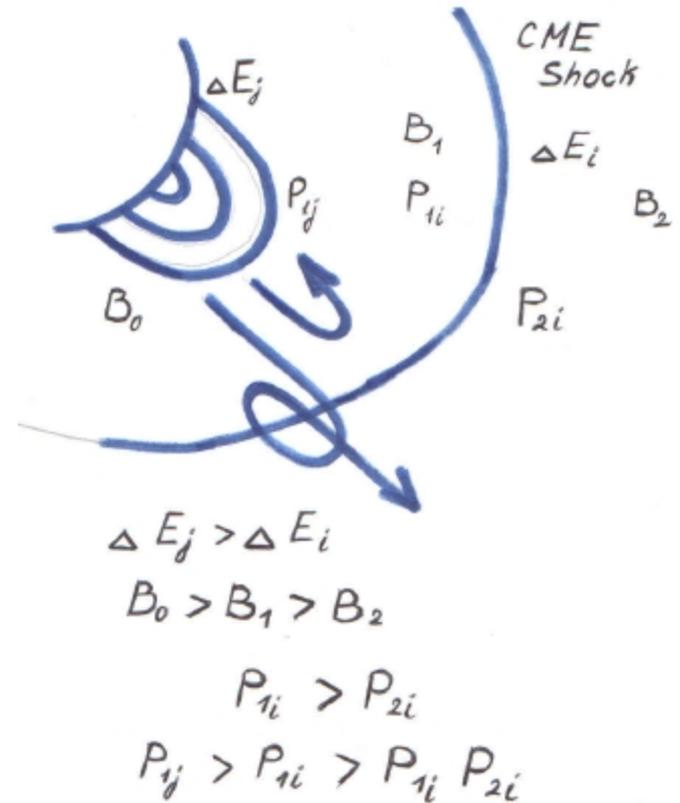


Figure 6. Schematic showing the possible scenario and locations of high-energy proton acceleration and reacceleration during the flare-CME eruption on 2017 September 10. Connection arrows illustrate the particle transfer episodes, labeled according to the γ -ray phase numbers defined in Figure 1. Arrow X symbolizes reconnection outflows affecting the flare arcade during Phase 3.

Acceleration of high-energy protons by collisions against irregularities of the magnetic field is known as Fermi-type acceleration (Fermi 1949). Compressive and turbulent plasma flows associated with the solar flare-CME eruption provide a number of opportunities for Fermi acceleration, either of the first-order (regular) acceleration in compressive flows or of the second-order (stochastic) acceleration in turbulence of various kinds, or both.



Поле Драйсера (Dreicer, 1959)

При значениях поля меньше драйсеровского, субдрайсеровских, ускоряться могут только быстрые частицы, находящиеся в хвосте максвелловского распределения скоростей. при значениях поля, превышающего драйсеровское, супердрайсеровских, ускоряются большинство частиц (Лысенко и др., 2020).

$$E_D \cong 10^{-8} n/T \text{ В/см (Trubnikov, 1955)}$$

Разброс поля Драйсера для ($T=10$ МК, $n=2.5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, 1415 МГц) и ($T=30$ МК, $n=7.4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$, 245 МГц) будет от $2.5 \cdot 10^{-5}$ В/см до $2.5 \cdot 10^{-7}$ В/см

Оценка времени ускорения $\tau = p/cE_D$, где $p = c \sqrt{m^2 + m_0^2}$, будет от 2.4 до 45 с для электрона 100 кэВ.

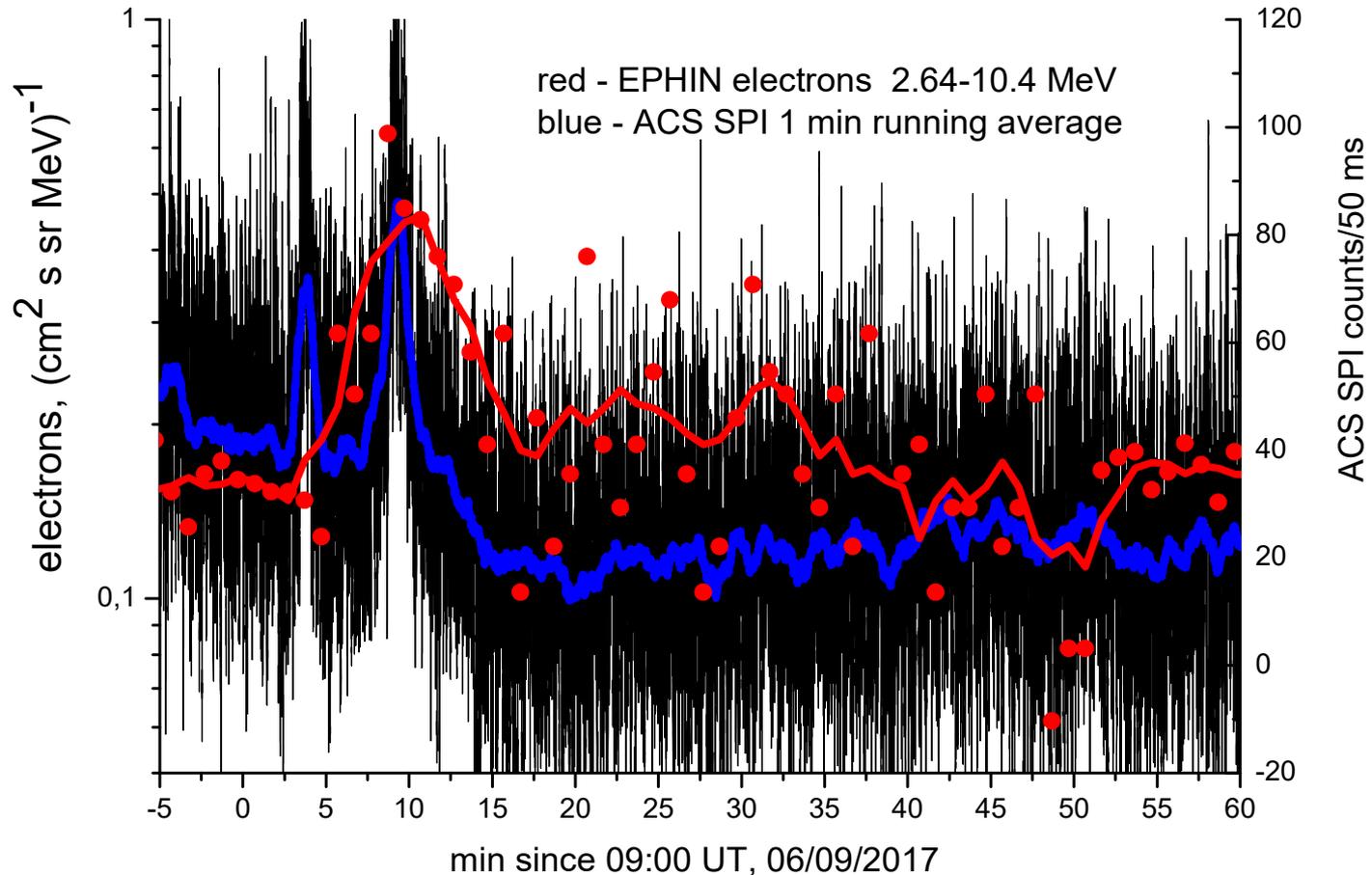
Поле пересоединения, максимальная энергия

$$E = \frac{1}{c} BV$$

Оценка поля пересоединения для вспышки 6 июля 2012 X1.1 в момент $T_{max} = 25 \text{ МК}$, L_{max} – размер области вспышки $L(t) < \sqrt[3]{EM(t)/2n_0(t)^2}$, и максимальной энергии ускорения (без учета потерь на излучение) $\epsilon_{max} \cong EL_{max}$

ν [MHz]	$n[\text{CM}^{-3}]$	L [Mm]	$dL/dt[\text{km/s}]$	B [Gs]	E [V/cm]
1415	$2.5 \cdot 10^{10}$	27	135	66	8.9
610	$4.6 \cdot 10^9$	85	415	28	11.6
410	$2.1 \cdot 10^9$	140	705	19	13.4
245	$7.4 \cdot 10^8$	280	1400	11	15.4
245	$7.4 \cdot 10^8$	280	1400	66*	92.4

Ограниченные вспышки, электронные события



06.09.2017, X2.2 0900 UT

Струминский и др., 2020;
Григорьева и Струминский 2021