

Формирование условий мощного источника солнечного протонного события 17 мая 2012 года

И.Ю. Григорьева¹, А.Б. Струминский²

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория
РАН, Санкт-Петербург

²Институт космических исследований РАН, Москва
e-mail: irina.2014.irina@mail.ru

Введение

Наличие корональных выбросов массы (КВМ) и солнечных протонных событий (СПС) в межпланетном пространстве (МП) после слабых мягких рентгеновских (SXR) вспышек уже не является необычным фактом.

Однако до сих пор не понятно, каким образом в таких случаях могут реализоваться близкие к предельным характеристики КВМ и СПС. В работе исследована длительная прилимбовая корональная вспышка M5.1 17 мая 2012 года с невыраженной импульсной фазой – источник солнечных энергичных частиц (протонов и электронов), зарегистрированных вблизи Земли спустя 15 минут после официального начала в SXR-излучении.

В работе представлены факты, не использованные в исследованиях других авторов (например, [Gopalswamy et al., 2013](#)): длительное гамма-излучение (Share et al., 2018), вероятное длительное стохастическое ускорение релятивистских электронов и протонов > 100 МэВ и благоприятные условия их распространения.

Из сравнения характеристик КВМ и солнечных протонных событий 17 мая 2012 года и 09 августа 2011 года следует отсутствие непосредственного влияния КВМ на ускорение и распространение энергичных частиц. Формирование условий для мощного источника солнечных электронов и протонов произошло на длительной постэруптивной фазе 17 мая 2012 года. Такие условия не были созданы в импульсной вспышке X6.9 9 августа 2011 года с коротким временем ускорения КВМ (287 с).

Проблема взаимосвязи вспышек,

КВМ, СКЛ

Напомним:

Какая последовательность процессов на Солнце приводит к положительной обратной связи между нагревом плазмы, ускорением электронов, нагревом и движением плазмы, приводящим к формированию КВМ и ускорению протонов?

- Фазы ускорения частиц
1ая - электроны <100 кэВ
2ая - электроны >100 кэВ
и протоны
(Wild et al., 1964)
- Два механизма вспышек
(Sturrock, 1966)
- Два типа вспышек – импульсные и эруптивные (Pallavicini et al., 1977), эпоха SkyLab
- Миф солнечных вспышек – все делают КВМ (Gosling, 1993)
- Механизм один, но разная сила магнитного поля (Svestka, 1995)
- Вспышки, КВМ и СКЛ (Cliver, 2019)
- Два типа СКЛ событий - наличие электронов от импульсной фазы (Sharykin et al., 2015; Струминский и др., 2020)

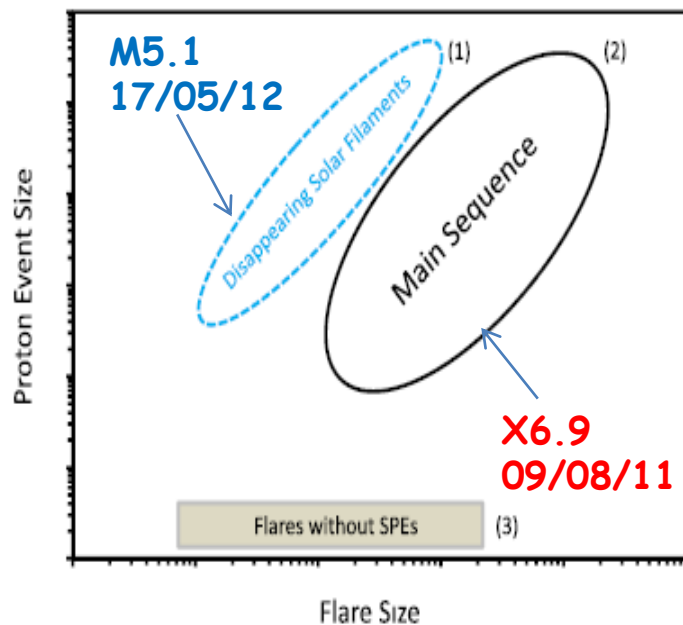


Figure 17. Schematic comparison of SPE vs. flare size parameters for large, well-connected SPEs showing three characteristic zones of events: (1) DSF-associated SPEs, (2) main sequence of SPEs associated with big flares and strong shocks, and (3) non-SPE events with either no or slow associated CMEs.

(Cliver, 2019)

Для ответа на этот **вопрос**

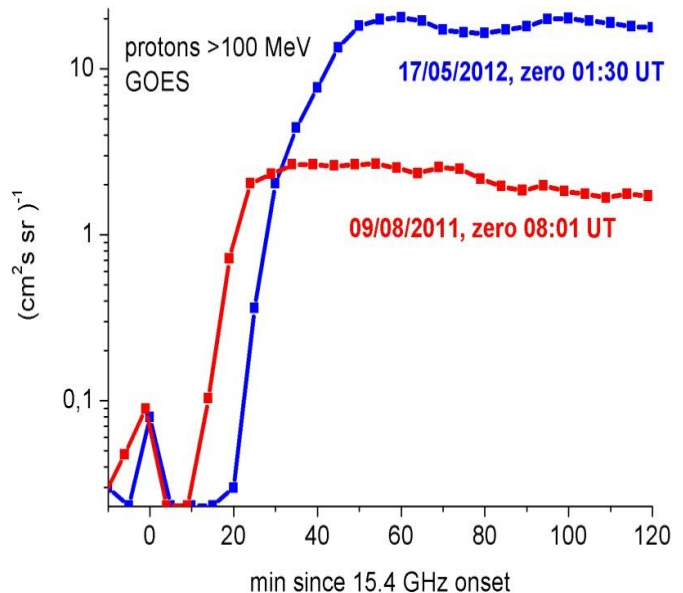
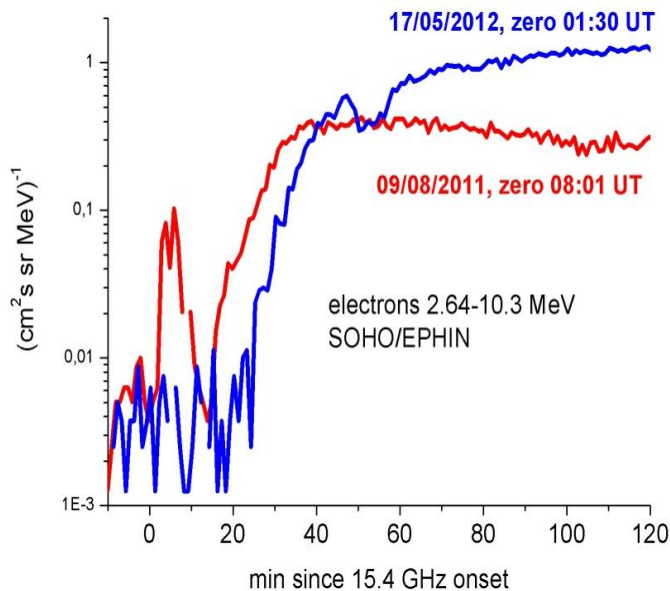
Мы исследуем вспышки:

- **постепенную M5.1 17.05.2012** (Gopalswamy et al., 2013)
- **импульсную X6.9 09.08.2011** (Sharykin et al., 2015; Struminsky et al., 2020)

Используем информацию:

- **О нагреве плазмы** - SXR (GOES) → T, EM и dT/dt ;
- **О движении плазмы в области вспышки** - SXR (GOES) → dEM/dt ; AIA (SDO), дрейф по частоте (1415-245 МГц, RSTN);
- **Об ускорении электронов** - микроволны (15.4-2.695 ГГц, RSTN), HXR > 150 keV (Anti-Coincidence Shield of Spectrometer on INTEGRAL — ACS SPI), солнечные электроны в МП (EPHIN/SOHO);
- **О положении КВМ** - LASCO/SOHO (C2-C3);
- **Об ускорении протонов** - γ -излучение > 100 МэВ (FermiLAT, Ackermann et al., 2014; Share et al., 2018), солнечные протонные события (> 100 МэВ, ACS SPI)

Солнечные релятивистские электроны и протоны > 100 МэВ

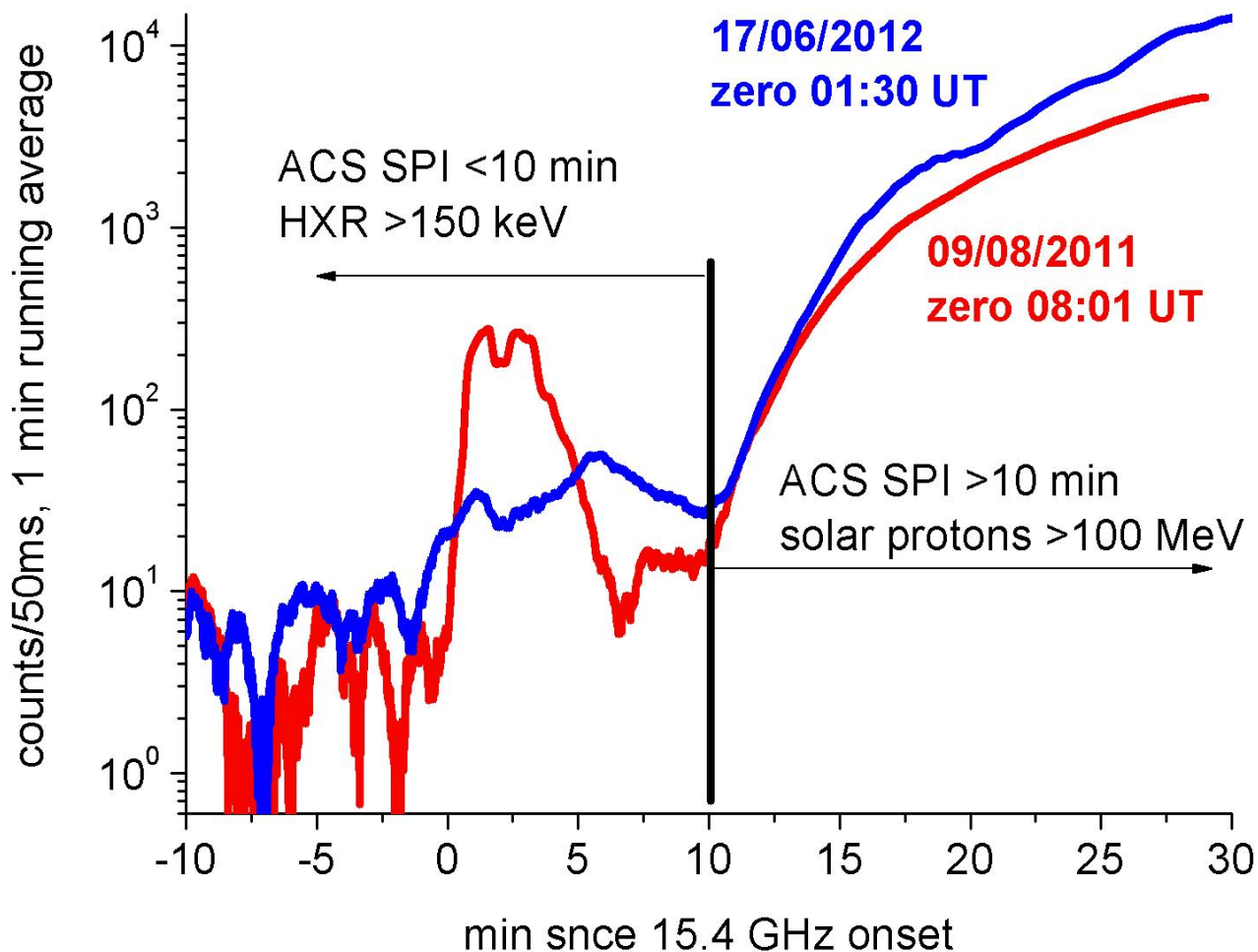


На слайде 5 на рисунках до 35 минуты интенсивность электронов и протонов в МП больше в событии 9 августа 2011 года, т.е. ускорение частиц и их выход в МП были более эффективными.

Из сравнения временных профилей релятивистских электронов (SOHO/EPHIN) и протонов (GOES) следует вывод о необходимости длительного стохастического ускорения (для 17.05.2012, [Струминский 2019](#)) и (для 09.08.2011, [Struminsky et al, 2020](#)).

Здесь и далее шкала времени на рисунках представлена от начала радиоизлучения на 15,4 ГГц (RSTN данные).

НХР-излучение >150 кэВ и протоны > 100 МэВ, ACS SPI



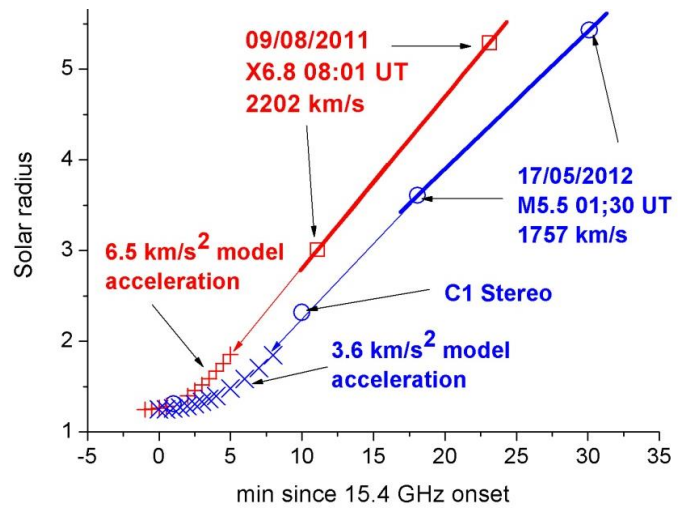
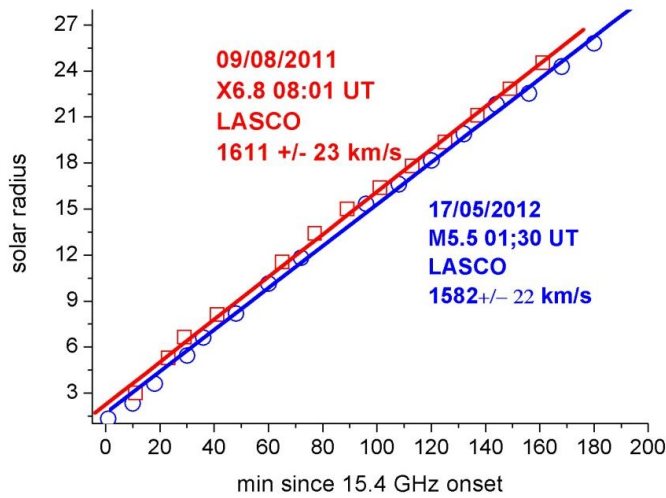
На слайде 6 на рисунке показано НХР-излучение (до 10-ой мин), не коррелирующее с наблюдаемой интенсивностью протонов (после 10-ой мин). Не исключено, что между 10 и 12 мин ACS SPI продолжал регистрировать НХР-излучение. Начиная с ~12 мин интенсивность протонов, регистрируемых ACS SPI, оказалась больше 17 мая 2012 года (спектр протонов в GLE-событии более жесткий).

Фармент Table 3, Spectral Characteristics of LPGRE Events
(Characteristics of Late-phase >100MeV Gamma-Ray Emission in Solar Eruptive Events,
[Share et al., 2018](#))

Date (Event) yyyy/mm/d	Type	Observing Interval, UT	Flux >100 MeV $10^{-4} \gamma \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ s}^f$	Proton PL Index	Emission Interval, UT	>500 MeV Protons $\times 10^{28}$ (Correction Factor) ^a
2011 Aug 09	LPGRE	08:02:40– 08:06:00	2.0 ± 0.2	5.8 ± 0.9	08:02:40– 08:06:00	$0.4 \pm 0.1 (1.4)^a$
	LPGRE <300 MeV			4.3 ± 0.3^c		
	X6.9 flare				08:02:00– 08:02:20	$<0.01 (1.4)^a$
	X6.9 flare				08:03:40– 08:04:00	$<0.01 (1.4)^a$
	SEP protons					
2012 May 17	LPGRE (1)	02:10– 02:48	0.08 ± 0.03	2.6 ± 0.6	02:05– 02:29	0,02
	LPGRE (2)	03:46– 04:22	0.05 ± 0.025	2.2 ± 1.0	02:29– 04:02	0,1
	LPGRE (3)				04:02– 05:20	0,03
	LPGRE Total				02:10– 05:20	0.15 ± 0.1 $(1.4)^a$
	M5.1 flare				01:40– 01:55	$<0.6^b$
	SEP protons					143 ± 92

Из таблицы видно, что гамма-излучение в событии 09.08.2011 регистрировалось только 3 мин 20 с во время НХР-всплеска, больше оно не регистрировалось. В событии 17.05.2012 гамма-излучение наблюдалось 2 часа 50 мин (после (+30) мин в нашей шкале). Из различия длительности зарегистрированного гамма-излучения следует, что функция инжекции протонов в МП 17 мая 2012 года могла быть значительно более длительной.

КВМ: наблюдения и модель равномерного ускорения



На слайде 8 показаны наблюдавшиеся положения КВМ двух событий в масштабе 35 мин – 2 точки на LASCO_C2 (справа), и для КВМ 17 мая на график нанесено положение со STEREO_C1 (Gopalswamy et al., 2013). Все наблюдаемые положения нанесены в масштабе 200 мин (слева). Если учитывать все точки положения КВМ, то аппроксимация для обоих событий становится одинаковой с точностью до ошибок. Поэтому необходимо смотреть более детально. Обычно при статистических исследованиях протонных событий используют средние скорости КВМ, что сильно загроубляет возможные связи вспышки и КВМ. В нашей работе мы рассматриваем скорость первого появления КВМ (первые 2 точки) в поле зрения LASCO_C2. Далее, используя простейшую модель ускорения мы оцениваем необходимую длительность ускорения и величину ускорения для согласования с наблюдаемыми положениями КВМ LASCO_C2.

Предположим, что КВМ начал движение от t_0 с $V_0=0$ и $a = \text{const}$ от $R_0 = 1.25R_S$ до t . После t КВМ двигался $V=\text{const}$, которая известна из наблюдений LASCO, так как $R = A+Bt$, $V=B$, $a = B/(t-t_0)$, то сшивка ускоренного и равномерного движения дает

$$t = (2R_0 - 2A - Bt_0)/B.$$

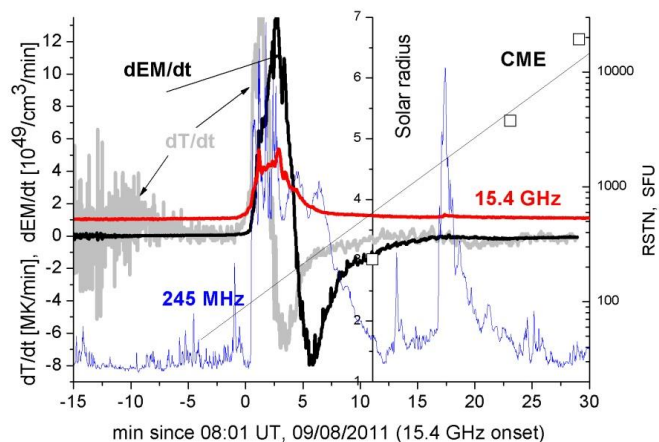
Событие	t_0 [s]	A [km]	B [km/s]	t [s]	a [km/s]
09.08.2011 08:01 UT	-60	629439	2202	278	6.5
17.05.2012 01:30 UT	0	606627	1757	527	3.6

Если считать, что момент начала ускорения КВМ (t_0) был не на (-60) секунде (в нашей шкале времени) для события 9 августа 2011 года, а позднее (например, в момент максимума температуры), то величины ускорения окажутся больше теоретически возможного предела.

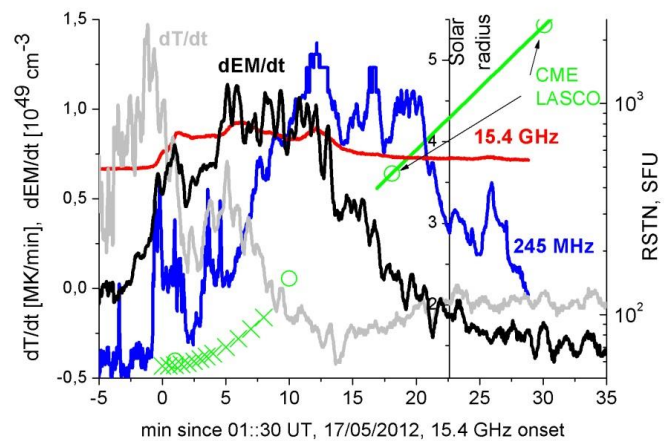
Так как средняя скорость КВМ по LASCO 1610 км/с (09.08.11) и 1582 км/с (17.05.12), то необходимо дополнительно замедлять с разной силой КВМ 09.08.11 и 17.05.12. Иными словами, в случае 17 мая на постэруптивной фазе на КВМ действовали силы кроме силы тяжести и трения.

Изменение во времени T и EM (dT/dt, dEM/dt), радиоизлучение и положение КВМ

Импульсная 20 мин
X6.9 09.08.2011



Постепенная 49 мин
M5.1 17.05.2012

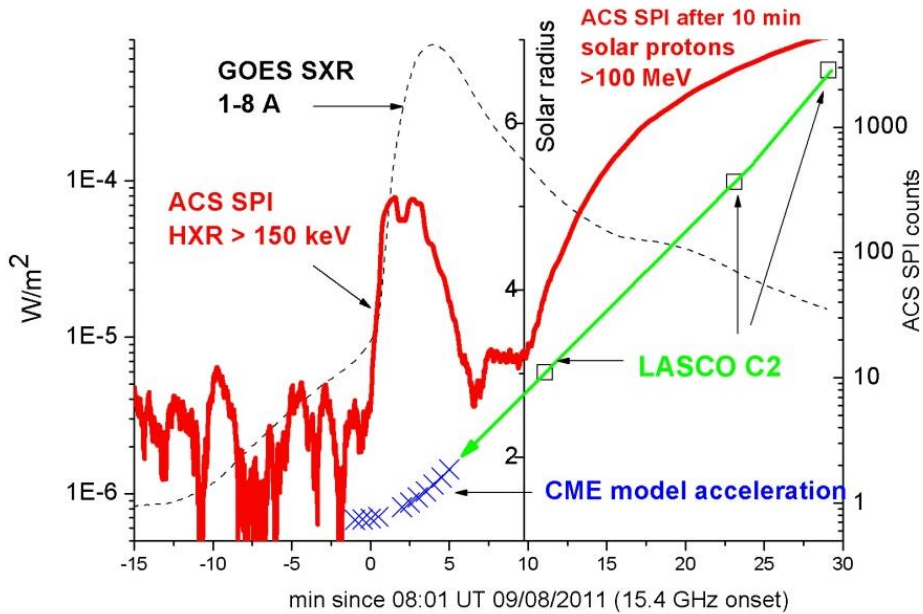


На рисунках слайда 9 графики производных по времени T и EM SXR-излучения позволяют говорить нам о силе хромосферных эффектов. Так 9 августа 2011 года характерные времена и величины производных превышают значения 17 мая 2012 года. Обратим внимание, что в обоих случаях в начале регистрируется радиоизлучение на 245 МГц (ускоритель находится в короне) и микроволновое излучение (15.4 ГГц) по данным RSTN. Это позволяет предположить, что ускоритель имел распределение по высоте, но в одном случае его нижняя часть «касалась» хромосферы (09.08.2011), а в другом – нет (17.05.2012) (см. слайд 4).

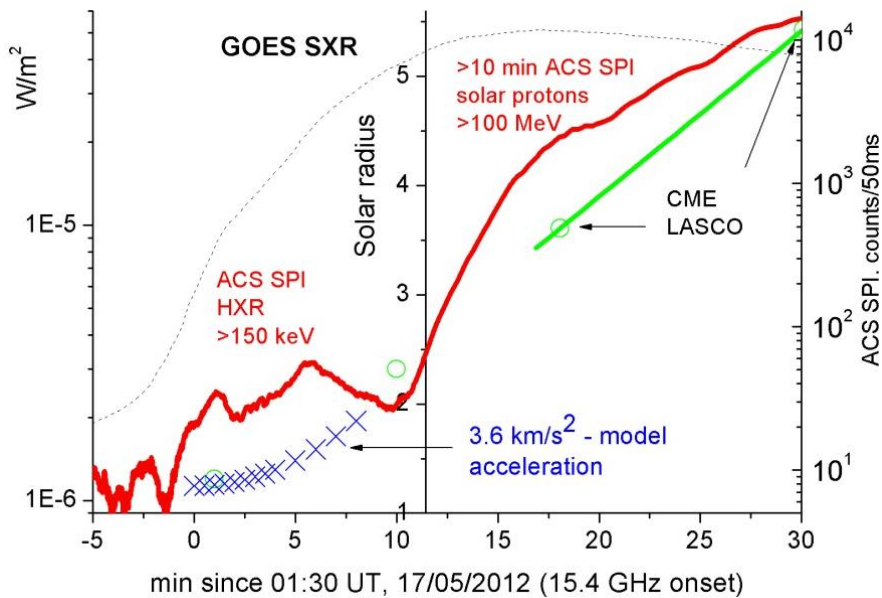
Напомним, что критериям протонного события (по радиоизлучению) вспышка 9 августа удовлетворяет, а 17 мая – нет (поток на 15.4 ГГц < 500 sfu).

Временные профили SXR (GOES), HXR и протоны (ACS SPI), положение КВМ (наблюдения и модель)

Импульсная 20 мин, X6.9 09.08.2011



Постепенная 49 мин M5.1 17.05.2012



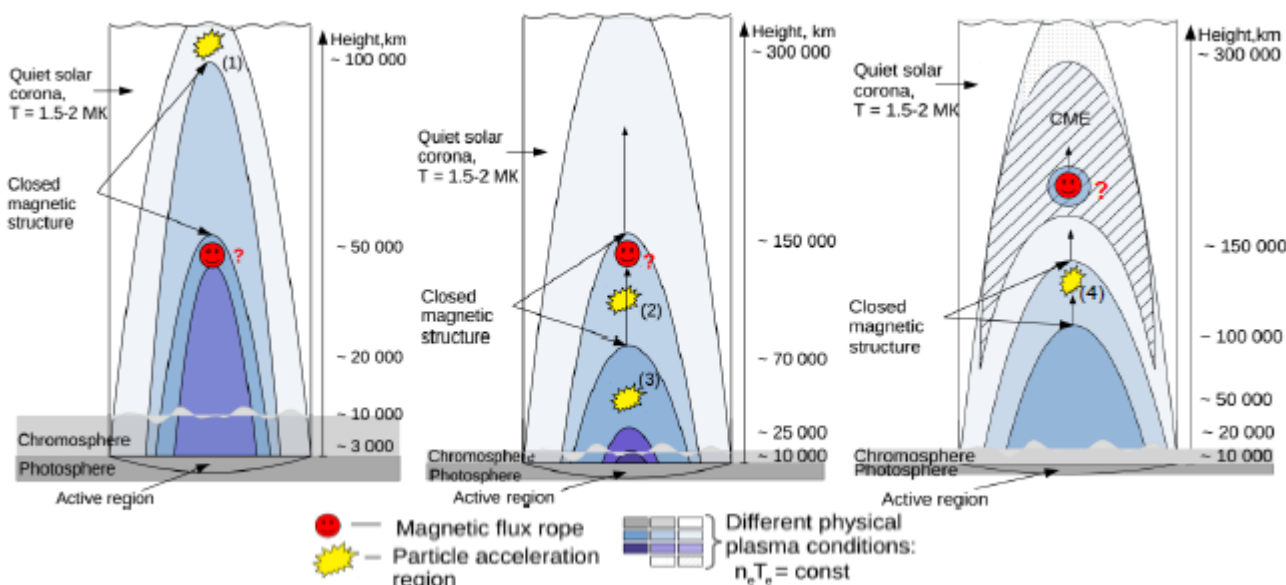
На рисунках слайда 10 из сравнения профилей SXR-излучения следует, что вспышечные процессы 09.082011 затухали после 10 мин, а в событии 17.05.2012 они активно продолжались. Как показано на слайде 8, 17 мая на постэруптивной фазе на КВМ действовали силы кроме силы тяжести и трения. Эти силы могли быть результатом продолжающихся вспышечных процессов. Именно в это время, как показано на слайде 6, начиная с ~12 мин интенсивность протонов, регистрируемых ACS SPI, оказалась больше 17.05.2012 (спектр протонов в GLE-событии более жесткий), что также видно в таблице на слайде 7.

Сценарий развития эруптивных вспышек и, как следствие, ускорения солнечных протонов

Слева – ускорение нетепловых электронов с мягким спектром на высотах ~ 100000 км ($f_p \sim 245$ МГц, $n_e < 7.4 \cdot 10^8$ см $^{-3}$), электроны греют окружающую плазму, EM практически постоянна, магнитный жгут замкнут. Электронный спектр становится постепенно жестче.

По центру – область ускорения движется из (1) в (2), может случайно появиться новая область ускорения (3), T возрастает. Если область ускорения (3) близка к хромосфере, то может начаться хромосферное испарение (случай 09.08.2011). В результате расширения плазмы ускорение КВМ продолжается до $\sim 3.5 \cdot 10^5$ км *due to plasma expansion*.

Справа – далее КВМ (плазма выше замкнутых силовых линий, включающая магнитный жгут) движется с постоянной скоростью или слабо ускоряется/замедляется. Солнечные электроны < 10 МэВ и протоны > 100 МэВ продолжают стохастически ускоряться в области ускорения (4).



Выводы

- Рассмотрены вспышки : 1) без отклика хромосферы - M5.1 17.05.2012 и 2) с ярким откликом хромосферы - X6.9 09.08.2011. Они развивались : 1-ая вверх (выше в корону) и 2-ая сверху вниз и вверх (из нижней короны в хромосферу и выше в корону).
- Сначала происходит ускорение электронов < 150 кэВ (в результате тиринг- неустойчивости?), приводящее к нагреву плазмы без роста меры эмиссии и началу SXR вспышки, которые предшествовали КВМ.
- КВМ образуется в результате неустойчивости на высотах с $n < 2.5E10$ см⁻³, его свойства могут зависеть от эффектов, связанных с хромосферным испарением, как это было 09.08.2011.
- Из сравнения характеристик КВМ и солнечных протонных событий 17 мая 2012 года и 09 августа 2011 года следует отсутствие непосредственного влияния КВМ на ускорение и распространение энергичных частиц. Формирование условий для мощного источника солнечных электронов и протонов произошло на длительной постэруптивной фазе 17 мая 2012 года. Такие условия не были созданы в импульсной вспышке X6.9 9 августа 2011 года с коротким временем ускорения КВМ (287 с).

PS: Где стоят памятники явлениям
на Солнце?



Спасибо за
внимание!

