

ЭНЕРГИЯ ПЕРВЫХ ПРИШЕДШИХ ПРОТОНОВ И ИХ ТЕМП УСКОРЕНИЯ

А. Садовский, А. Струминский

ИКИ РАН

И. Григорьева

ГАО РАН

Введение

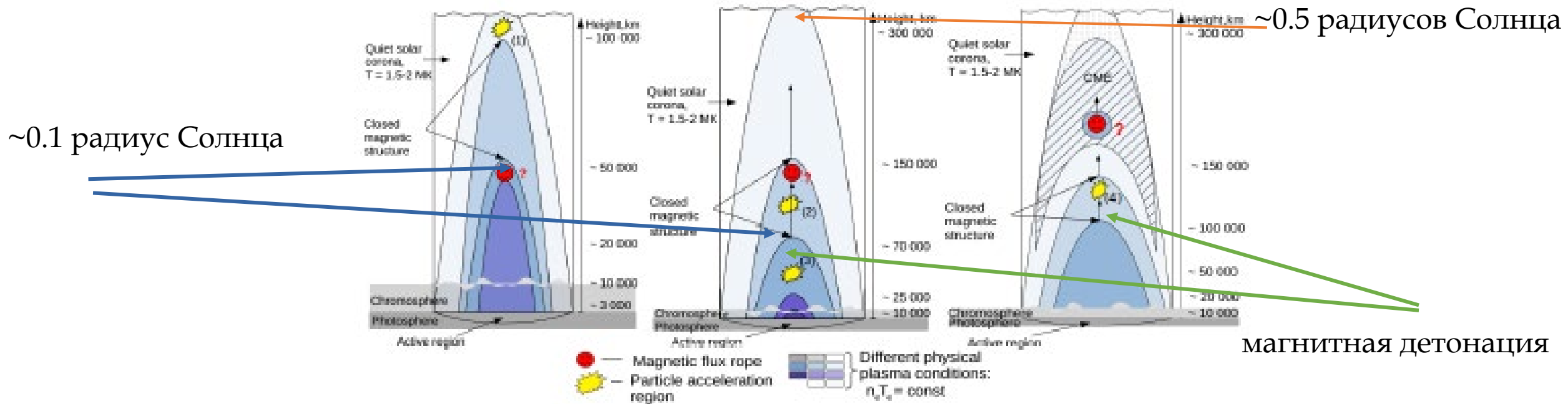
- Метод анализа дисперсии по скоростям (VDA – velocity dispersion analysis) широко используется для определения момента выхода протонов в межпланетное пространство (МП) по времени регистрации первого прихода протонов различных энергий.
- Метод VDA предполагает, что энергетический спектр к моменту выхода в МП уже сформировался, а выход всех протонов происходит одновременно, независимо от их энергии.
- Длительность ускорения может превышать время дисперсии по скоростям, а выход в МП может быть не одновременным.
- Исследуется неодновременность процессов прихода частиц.

Время ускорения электронов 100 кэВ и время прихода протонов 200 МэВ

- Предположим, что солнечные электроны и протоны ускоряются стохастически в турбулентном электромагнитном поле
- Тогда наблюдаемая неопределенность времени ускорения солнечных электронов до энергии (E) ~ 100 кэВ (от десятков до сотен миллисекунд), определяет и m_p/m_e раз большую неопределенность времени ускорения солнечных протонов (СП) до $E \sim 200$ МэВ.
- Разброс времени первого прихода на орбиту Земли СП с $E > 100$ МэВ при длине распространения 1.3 а.е. будет составлять порядка 10 мин и можно говорить о «раннем» и «позднем» приходе СП ($<$ и $> +20$ мин) в зависимости от темпа ускорения электронов (10 МэВ/с и 1 МэВ/с).

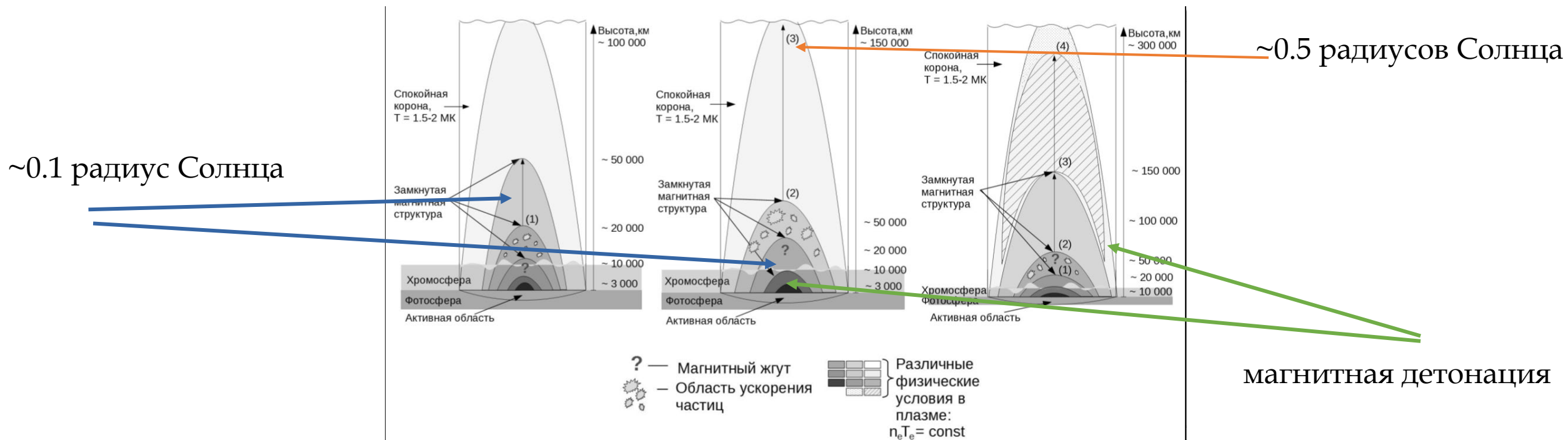
Процесс вспышки

- Солнечная вспышка - длительный процесс 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 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.

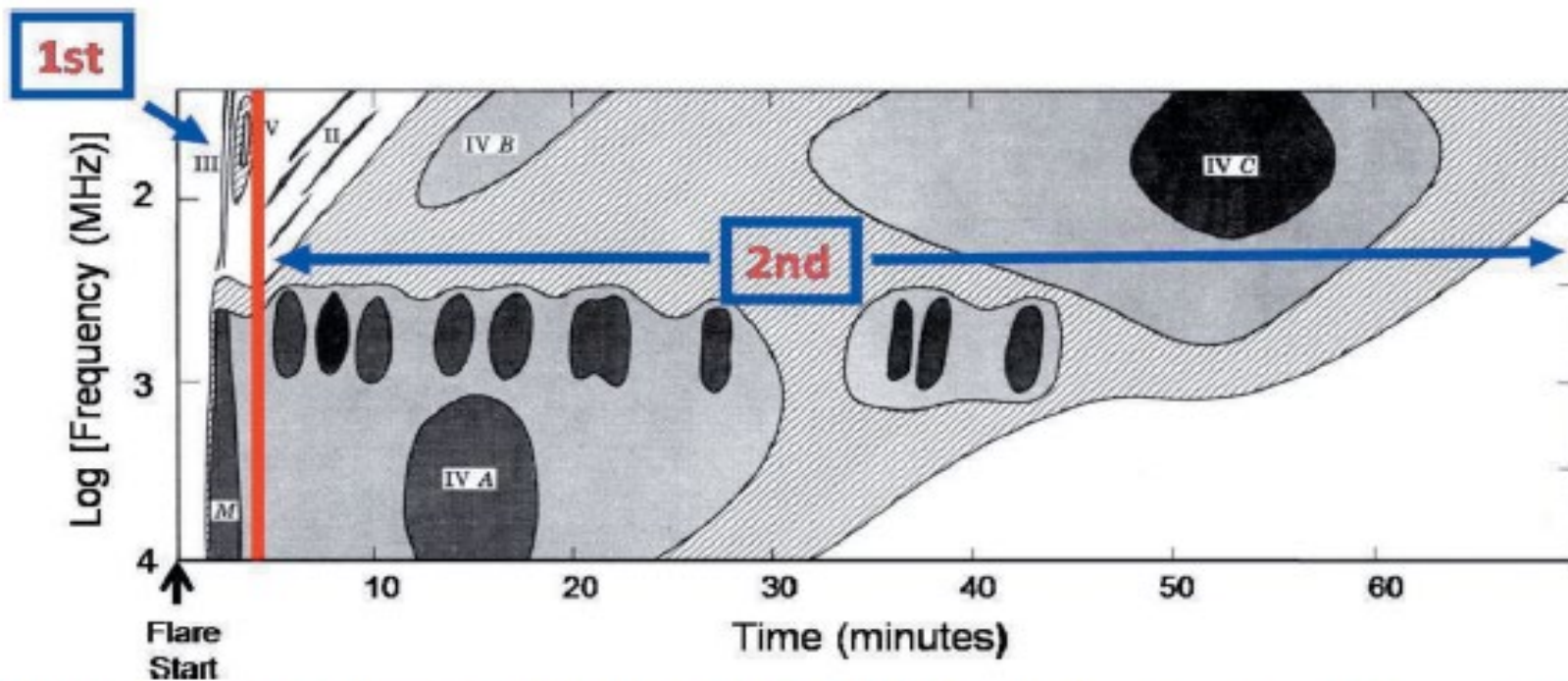


Процесс вспышки

- Солнечная вспышка - длительный процесс 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 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.



Две фазы ускорения частиц



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

© 2009 International Astronomical Union
doi:10.1017/S1743921309029639

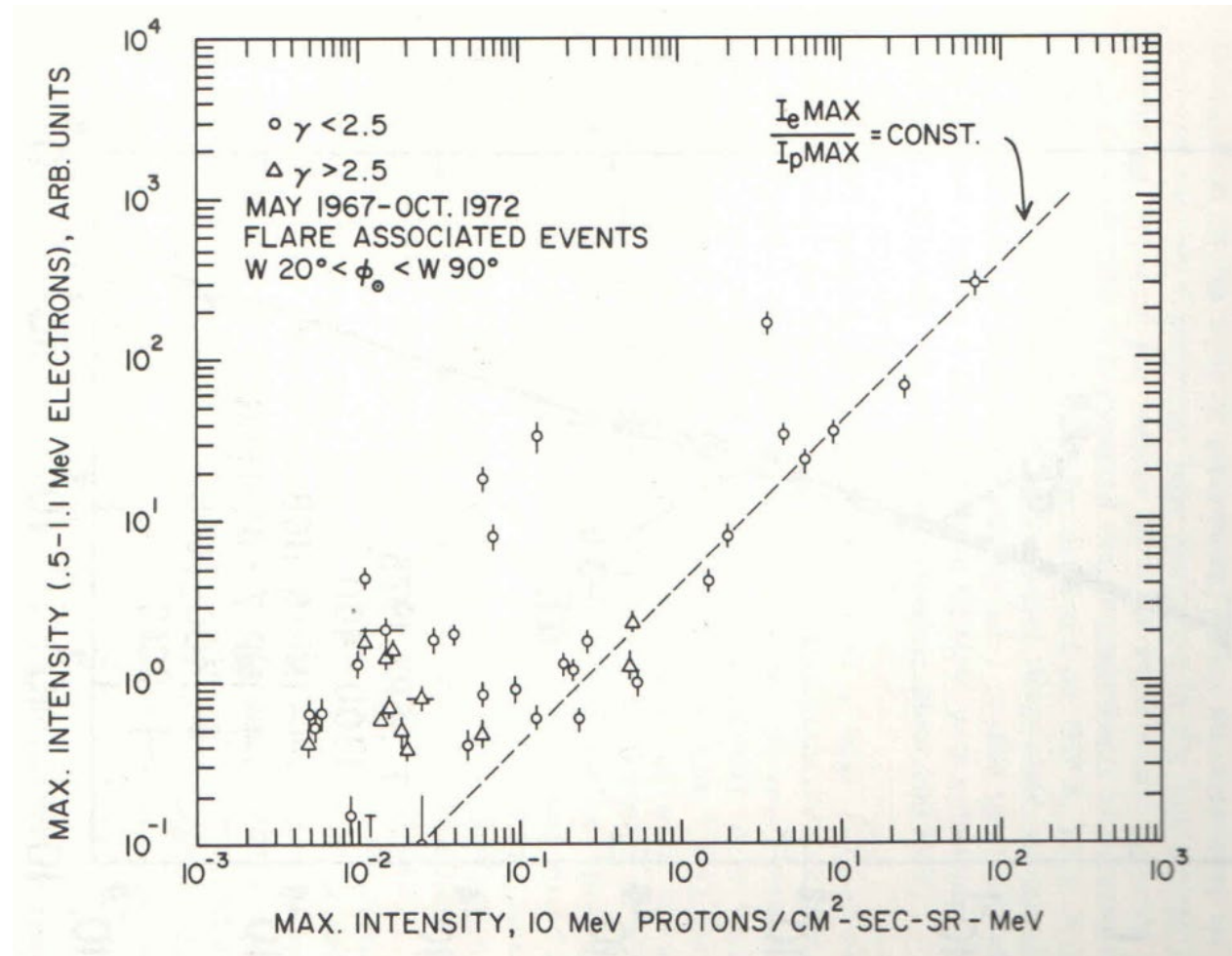
History of research on solar energetic
particle (SEP) events:
the evolving paradigm

Edward W. Cliver¹

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).

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.

Три условия ускорения во вспышках протонов >100 МэВ

- Температура плазмы >12 МК
- Ускорение электронов >100 кэВ
несколько минут и более
- Развитие вспышки на высотах
более 60 Мм

Набор энергии электронами

- Статистическое ускорение

$$\Delta\mathcal{E} = e \langle E^2 \rangle^{1/2} l_{st} N^{1/2}$$

- Считаем

$$\langle E^2 \rangle^{1/2} \sim E_{Dr} > 5.4 \cdot 10^{-5} \text{ В/см}$$

- Ускорение электрона до 10 кэВ соответствует характерным длинам

$$(l_{st} L)^{1/2} \approx 2 \cdot 10^{10} \text{ см}$$

- Ускорение в петле размером 50 Мм соответствует

$$l_{st} \approx 80 \text{ км}$$

- Соответствует ранее оценивавшимся размерам области пересоединения (~100 км, Rosner et al., 1978, Galeev et al., 1981, Shibata, 2011)

Время прихода протонов

- Пусть ускорение происходит в поле E , тогда характерное время приращения импульса

$$\tau = \frac{\Delta p}{eE}$$

- Время ускорения можно оценить, как разность между временем первого прихода протонов относительно НХР и времени распространения протонов до Земли.
- Средняя напряженность поля – порядка дрейсеровского

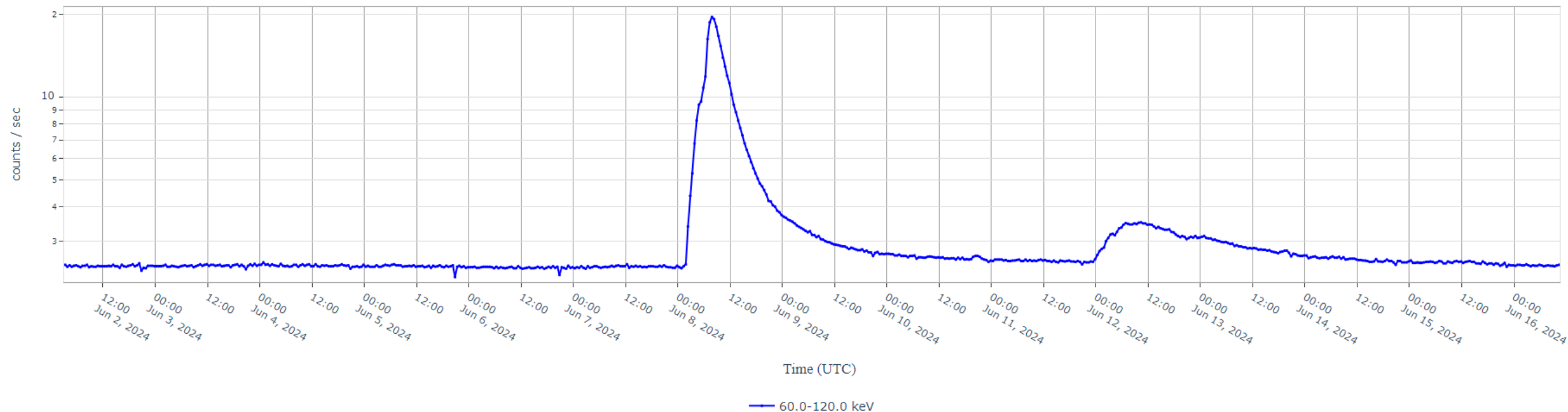
$$E \sim E_D = 10^{-8} \frac{n}{T}, \quad \text{В/см}$$

- Для типичных параметров (Лысенко и др., 2020)

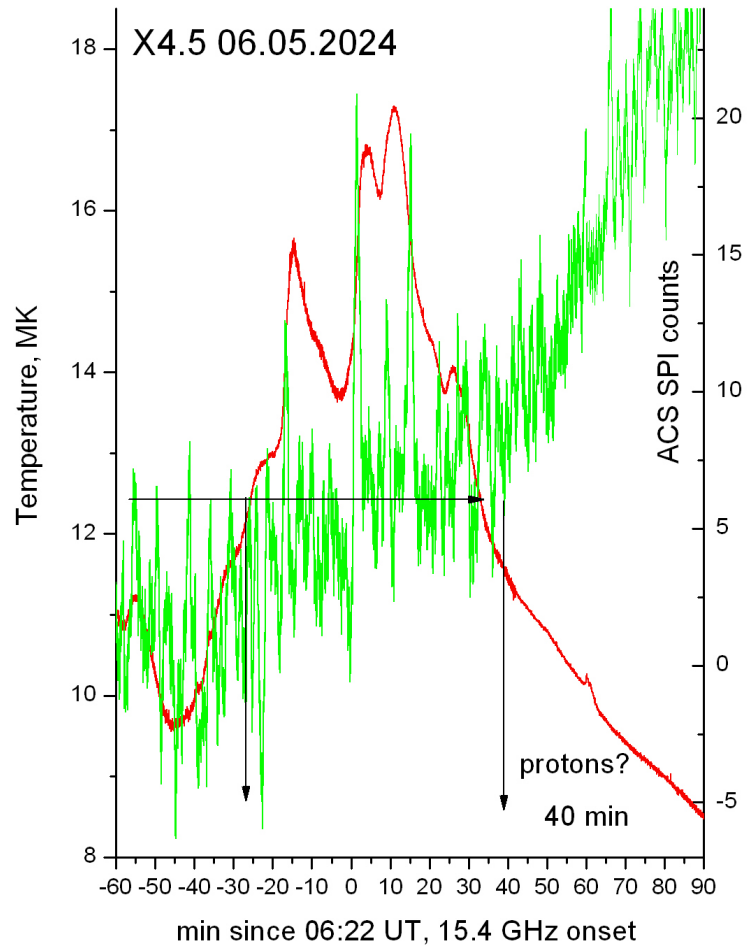
$$E_D = 10^{-4} \text{ В/см}$$

Примеры прихода протонов

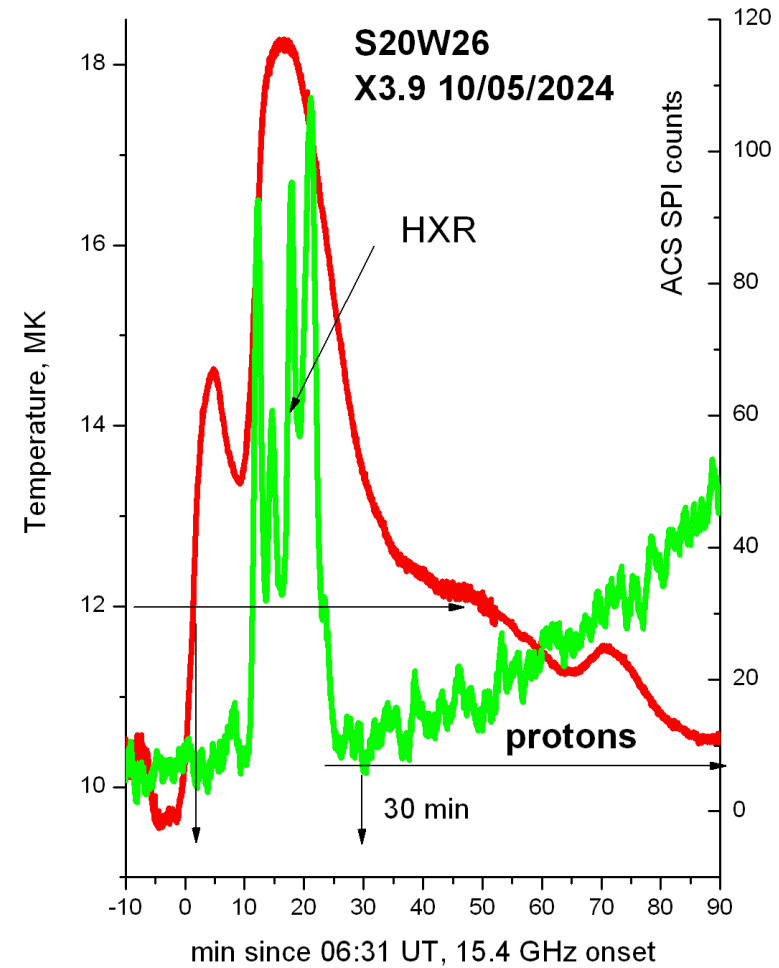
Спектр-Рентген-Гамма



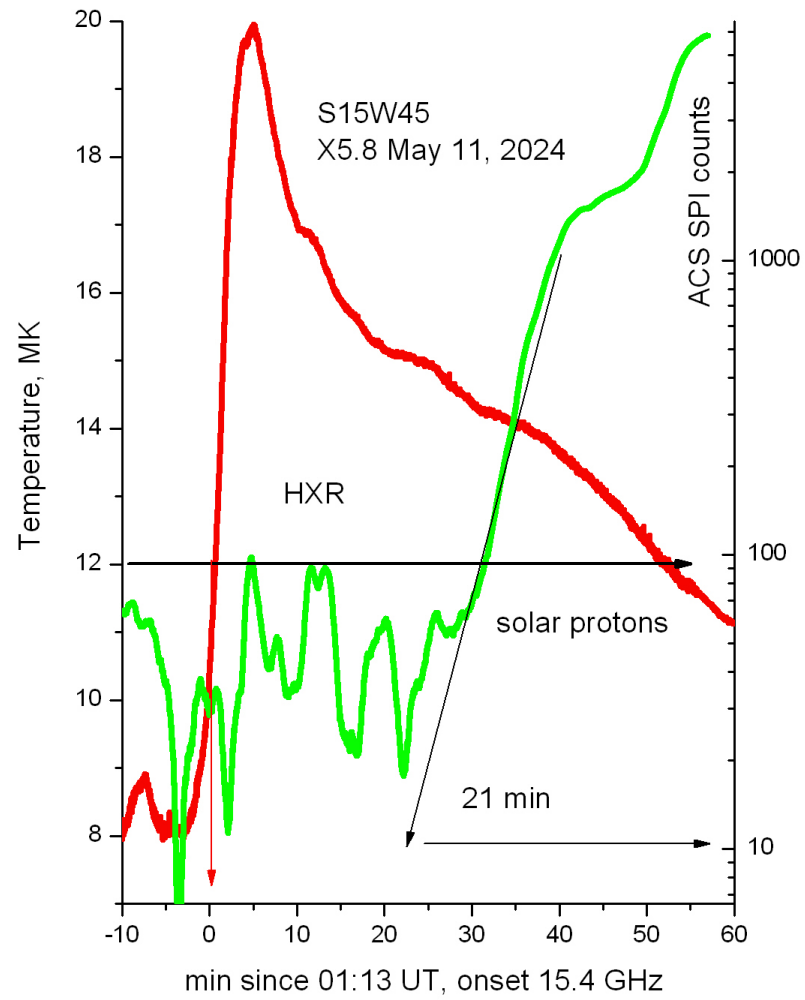
06.05.2024 X4.5



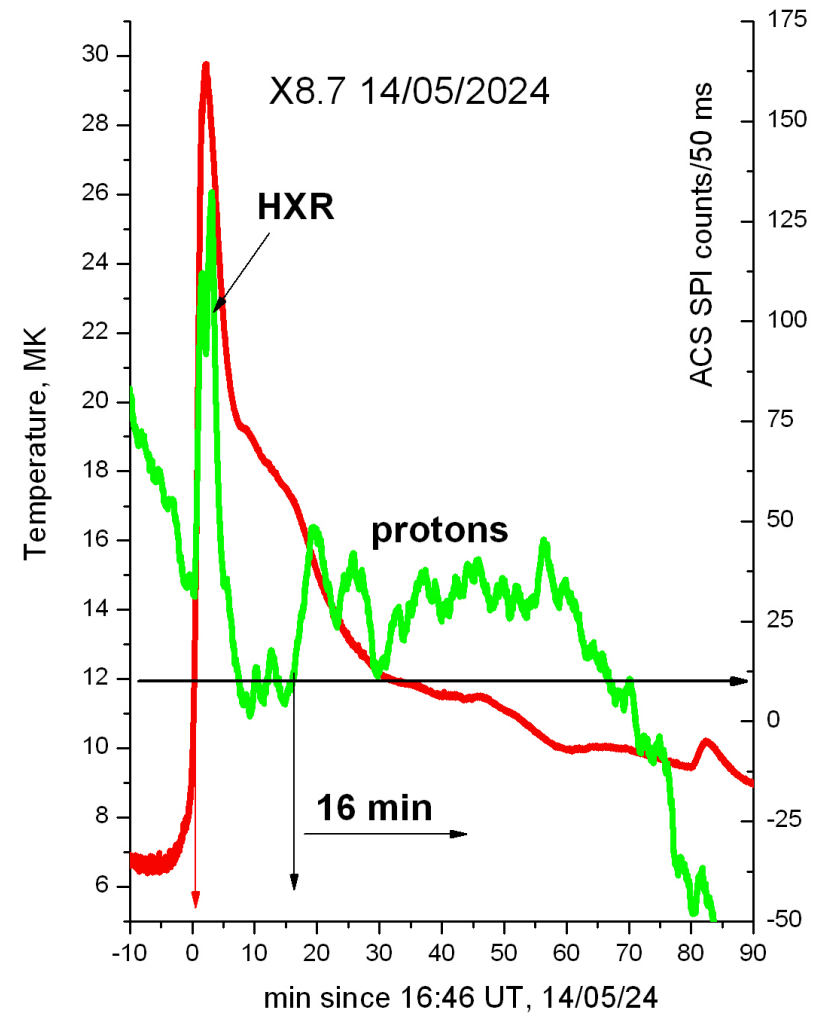
10.05.2024 X3.5



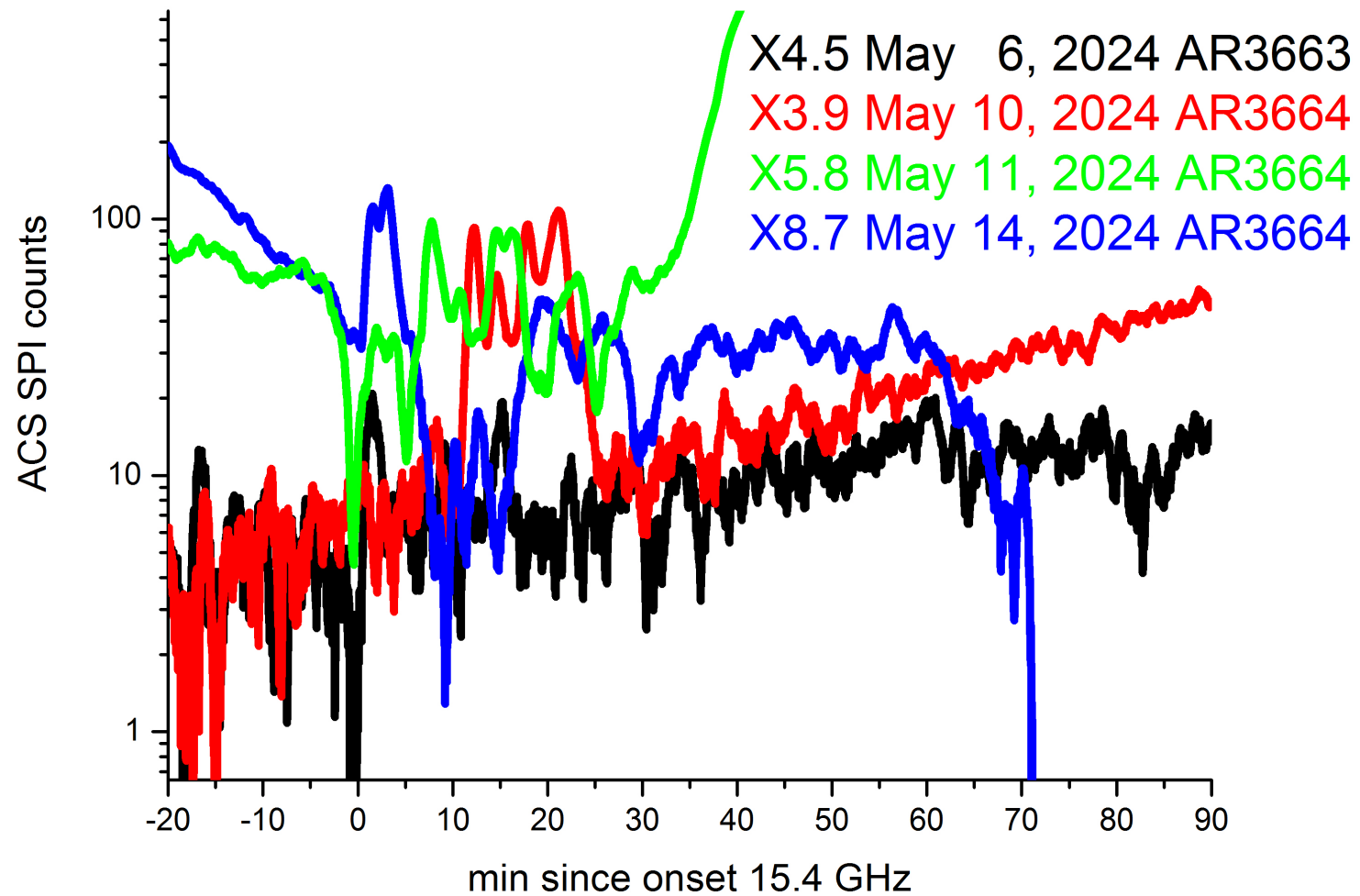
11.05.2024 X5.8



14.05.2024 X8.7



СРАВНЕНИЕ



Сравнение вспышечных процессов

- Чтобы первыми приходили протоны 1ГэВ, темп ускорения протонов $> 1.6 \text{ МэВ/с}$, поле $> 5.4\text{E-}5 \text{ В/см}$;
- Вспышка X4.5 6 мая 2024, AR3663, протонов не было, поле $< 1.7\text{E-}6 \text{ В/см}$;
- Вспышка X3.5 10 мая 2024, AR3664, протоны $< 100 \text{ МэВ}$, поле $< 1.9\text{E-}5 \text{ В/см}$;
- Вспышка X5.8 11 мая 2024, AR3664, протоны $> 500 \text{ МэВ}$ (GLE), поле $> 4.1\text{E-}5 \text{ В/см}$, ускорение $> 15 \text{ мин}$.
- Вспышка X8.7 14 мая 2024, протоны $< 300 \text{ МэВ}$, поле $< 5.6\text{E-}5 \text{ В/см}$, ускорение $< 8 \text{ мин}$, не хватило времени для ускорения протонов $> 500 \text{ МэВ}$.

Выводы

- Электроны >1 МэВ и протоны >100 МэВ ускоряются стохастически на фоне ускорения КВМ
- Магнитная детонация - a synergy of flares and CME
- 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.
- 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.
- Характерные размеры областей стохастического ускорения по порядку величины совпадают с размерами областей пересоединения, оценивавшихся в более ранних работах.

Две составляющих эруптивных
вспышек — замкнутые петли и КВМ



Спасибо за внимание!

