

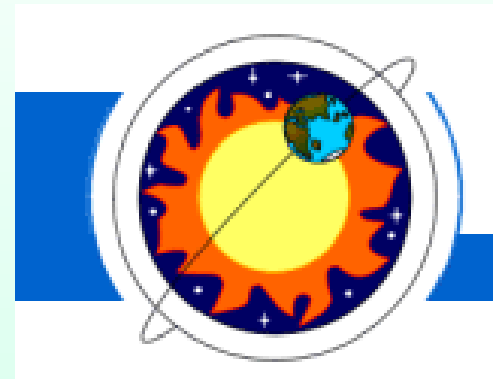
Выход ускоренных протонов в солнечных эруптивных событиях

В.И. Киселёв, В.В. Гречнев, А.А. Кочанов, А.М. Уралов

Институт солнечно-земной физики, Иркутск, Россия



Иркутск, 11-16 сентября, 2017

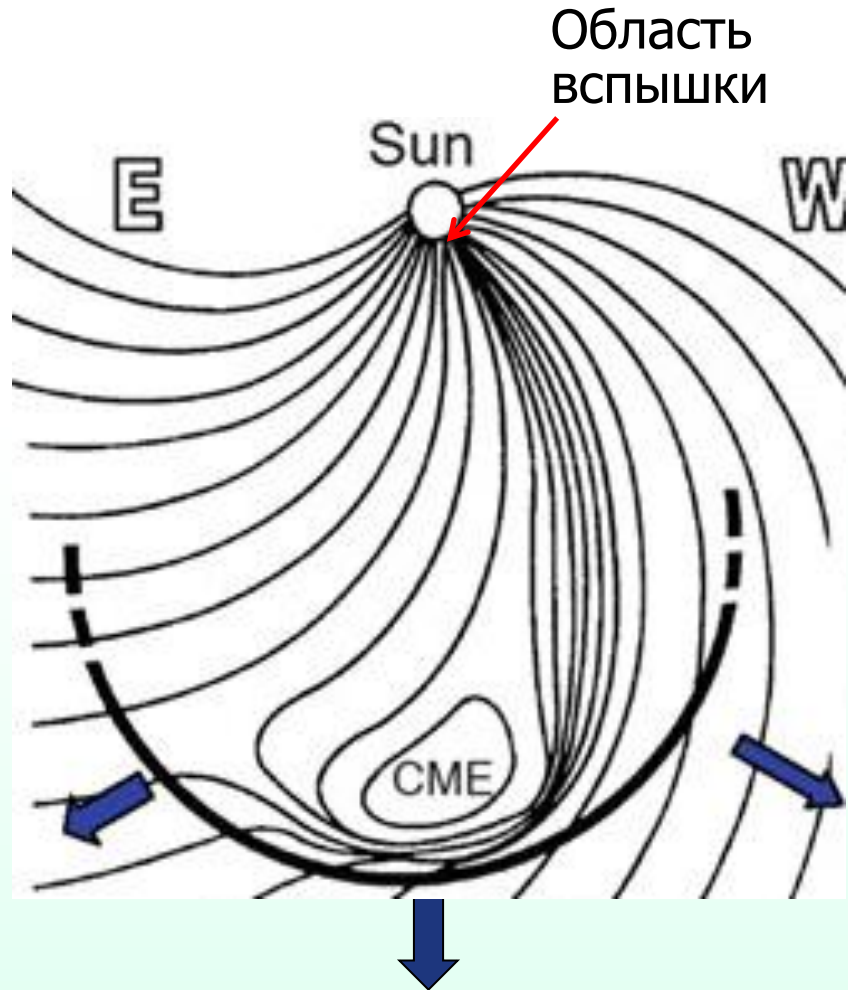


Источники солнечных ускоренных протонов

- Две концепции происхождения протонов:
 - Вспышечные процессы в активной области
 - Головная ударная волна перед внешней поверхностью сверххальфвеновского КВМ на $(1-2)R_{\odot}$
- Эти два источника считаются независимыми друг от друга, разнесёнными во времени и пространстве
- Давняя дискуссия о происхождении протонов высоких энергий > 100 МэВ

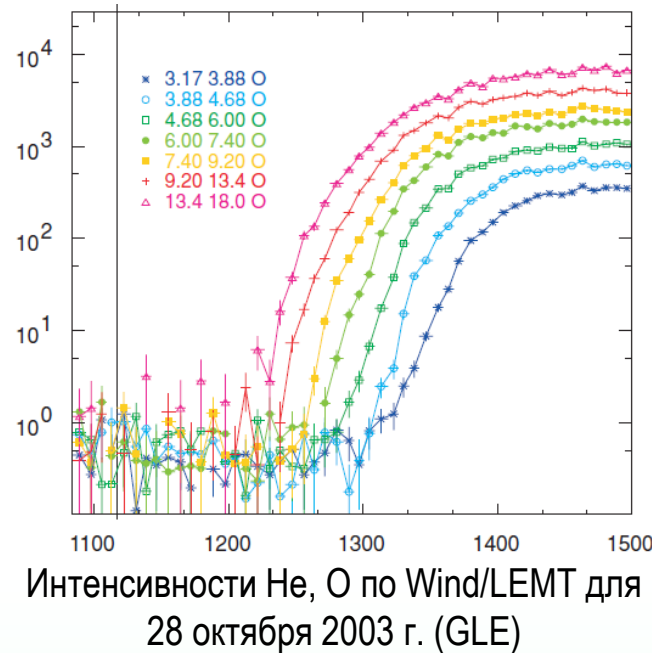
Предполагаемое расположение областей ускорения

- Предполагаемая область ускорения частиц на фронте ударной волны перед быстрым КВМ показана синими стрелками (Reames, 1999)
- Область вспышки показана красной стрелкой

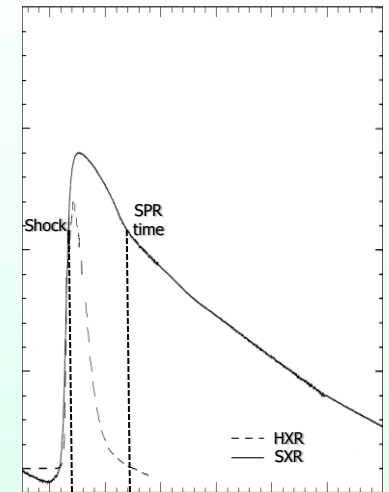
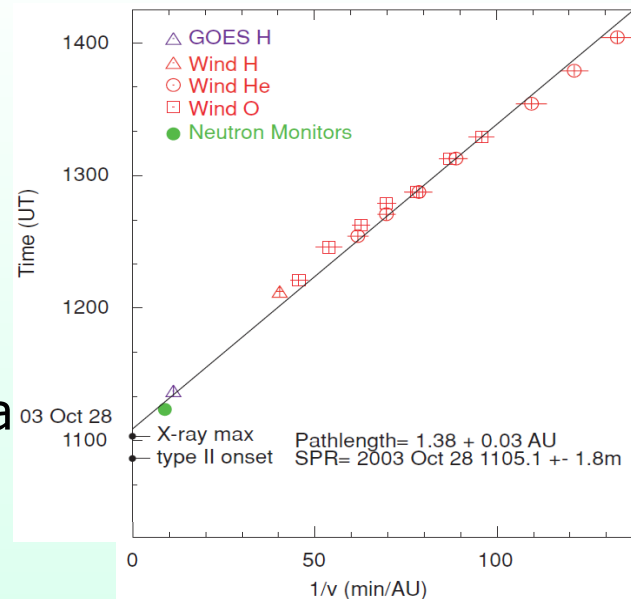


Анализ дисперсии скоростей (VDA)

- Оцененное из VDA время SPR – вблизи максимума мягкого рентгена и позже начала всплеска II типа, считающегося началом формирования ударной волны, ускоряющей ионы.
- Но, согласно последним исследованиям:
 - ударная волна образуется раньше – вблизи пика жёсткого рентгена
 - всплеск II типа начинается, когда волна достигает стримера.



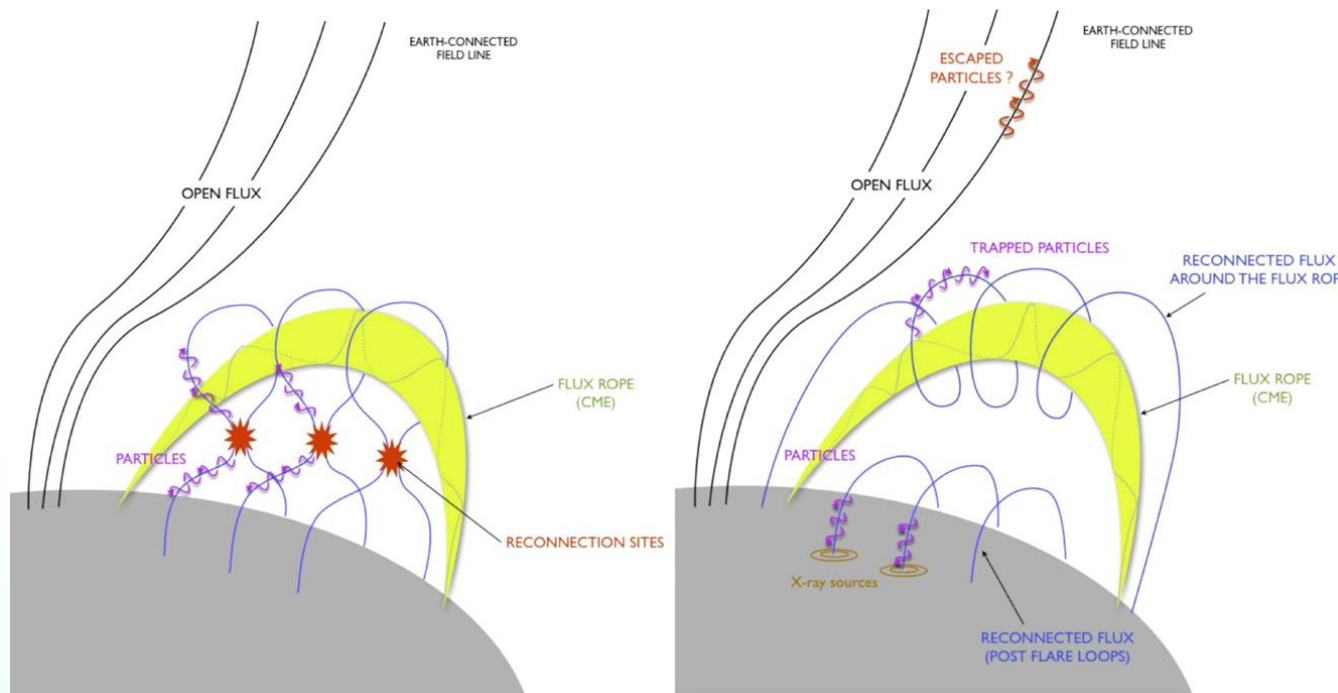
- 1) Определяется начало роста потока ионов разных энергий
- 2) Строится зависимость времени начала от $1/V$
- 3) Пересечение линии регрессии с нулём даёт время начала выхода ионов (SPR), а наклон даёт длину пути.



Задержка выхода энергичных протонов

- Задержку выхода протонов от Солнца считают аргументом в пользу ускорения частиц ударной волной (Reames, 2009).
- Но причиной задержки может быть перенос частиц магнитным жгутом, в который они инжектируются при вспышке, и их выходом в межпланетное пространство при пересоединении жгута с открытой структурой (Masson et al., 2013). ⇒

Сценарий переноса протонов магнитным жгутом

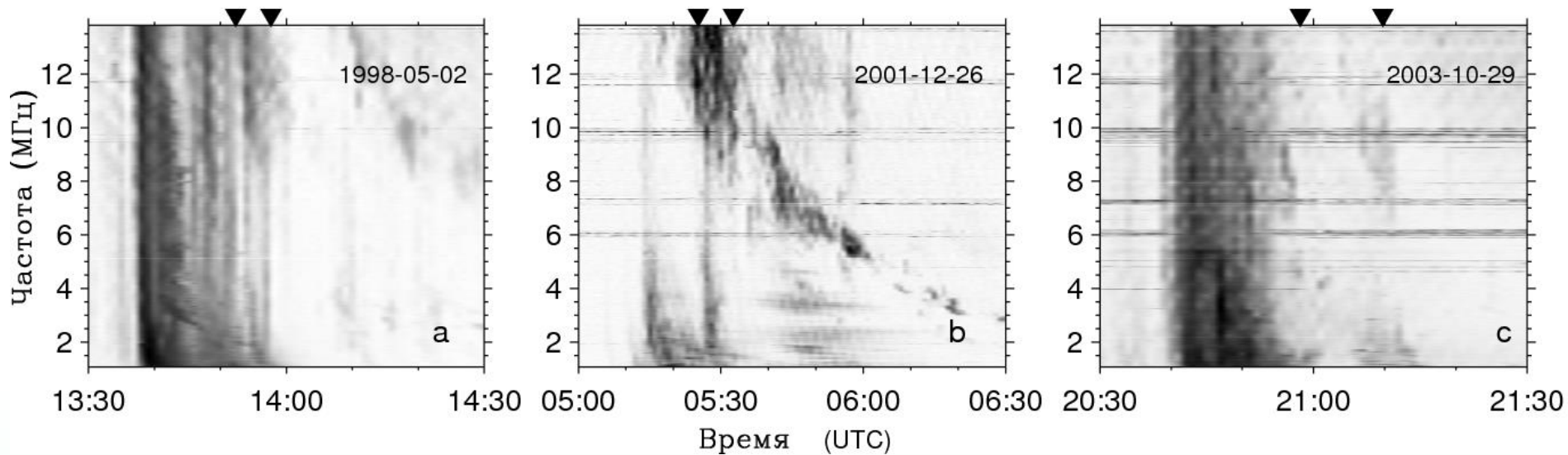


- Захват частиц в магнитный жгут. Затем их выход в межпланетное пространство при пересоединении с открытой магнитной структурой (Masson et al., 1999).
- Возможен одновременный выход протонов и электронов.

Цель и метод исследования

- Цель: Проверка сценария переноса ускоренных частиц из области вспышки магнитным жгутом.
- Метод: трассерами ионов могут быть электроны, проявляющиеся в радиовсплесках.
 - Сравнить оценённые времена выхода ионов с началом дека/гектометровых (ДГМ) всплесков III типа.
 - Сравнить отношение числа электронов и протонов при переносе магнитным жгутом и прямом выходе из области вспышки.
- Данные:
 - времена выхода ионов, оценённые методом VDA для 13 событий GLE 23-го цикла (Reames, 2009)
 - Радиоспектры Wind/WAVES (с 1994 г.)

Сравнение времени выхода ионов с началом ДГМ-всплесков III типа



- В каждом событии несколько ДГМ-всплесков III типа.
- 7 случаев: совпадение.
- 4 случая: разница < 5 мин.
- 2 случая: SPR значительно позже начала ДГМ-всплесков
 - 24 августа 1998 г. (GLE58) ~ 30 мин.
 - 29 октября 2003 г. (GLE66) ~ 15 мин.

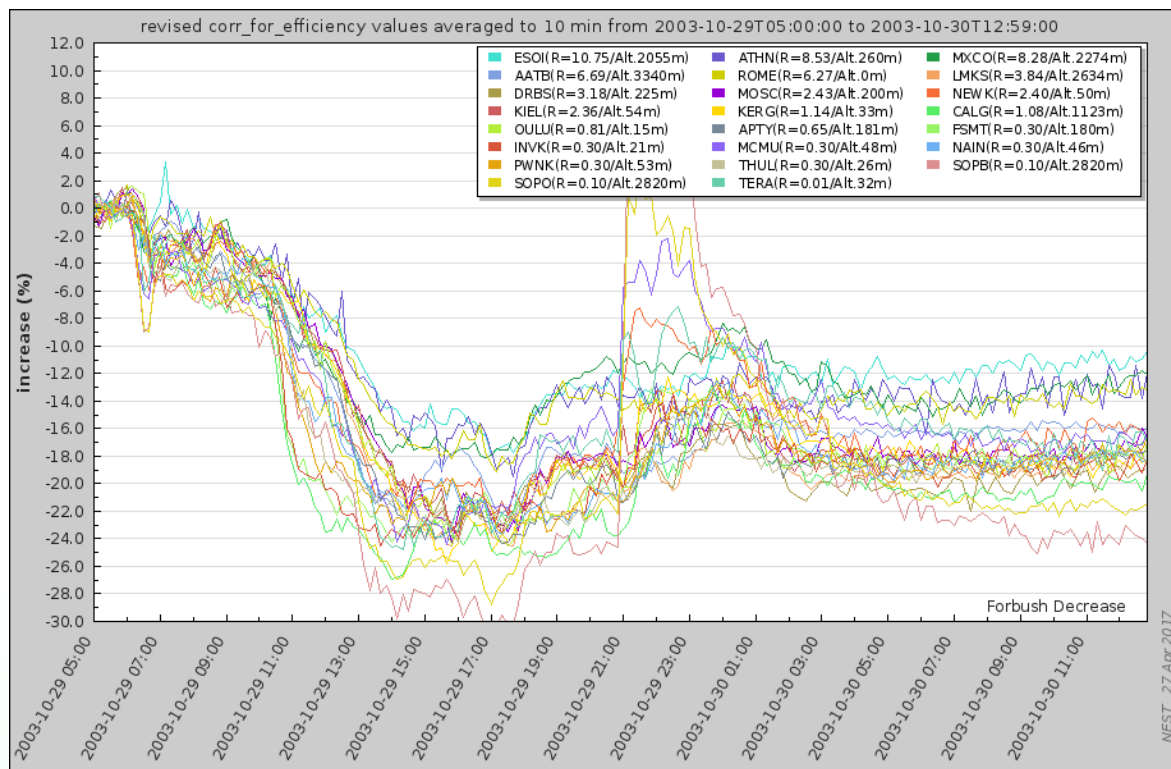
События GLE66 и GLE58

- SPR намного позднее волны Мортон (Balasubramaniam, 2007) и начала GLE66.

- GLE66 произошло на фоне сильнейшего Форбуш-понижения, вызванного магнитным облаком от предыдущего события. ⇒

- Движение этого магнитного облака (1900 км/с) влияло на магнитные пути частиц разных энергий, искажая результаты VDA.

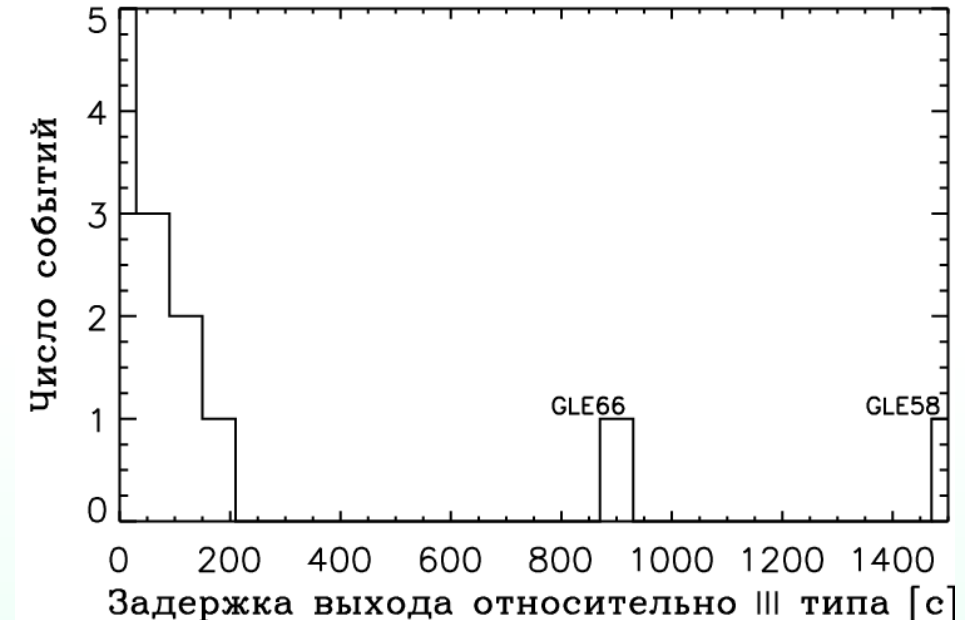
- SPR для GLE58 также было позднее волны Мортон (Vršnak et al., 2002) и начала протонного возрастания.



Вероятно, ошибки в оценках SPR были недооценены из-за энергозависимых эффектов распространения ионов.

Результаты анализа 13 GLE-событий

- Время выхода ионов в большинстве рассмотренных событий близко к началу ДГМ всплесков III типа.
- Большая задержка времени выхода ионов в GLE58 и GLE66 – следствие недооценки ошибок VDA из-за неучтённых эффектов распространения.
- Авторы статьи (Kocharov et al., 2017) пришли к аналогичному сценарию переноса ускоренных частиц магнитным жгутом.

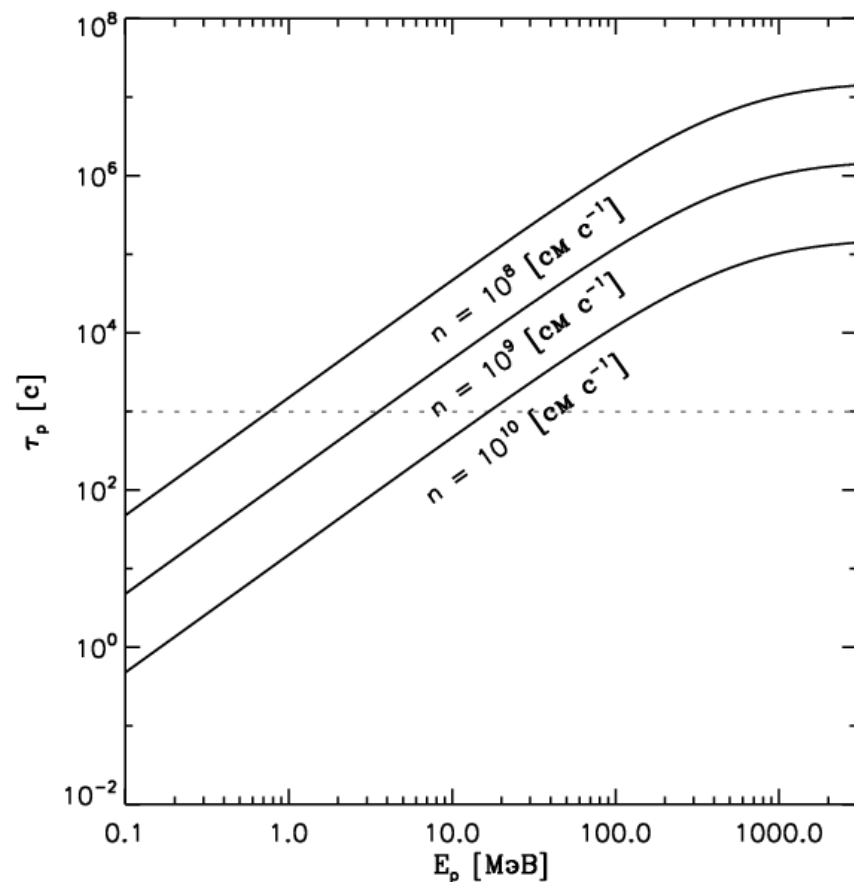


Отношение числа электронов к числу протонов

- Выделяют две категории событий:
 - «постепенные» – ускорение ударными волнами;
 - «импульсные» – ускорение во вспышке.
- Отношение числа 0,5-МэВ электронов к числу 100-МэВ протонов в «постепенных» событиях на два порядка ниже, чем в «импульсных» (Cliver, 2016).
- Вероятная причина различия – энергетические потери при кулоновских столкновениях частиц, захваченных в магнитном жгуте.

Времена жизни протонов и электронов

- Время жизни 100-МэВ протонов на два порядка величины больше времени жизни 0,5-МэВ электронов.
- При начальной концентрации плазмы в жгуте $n_0 > 10^{10} \text{ см}^{-3}$ релаксация электронов на кулоновских столкновениях резко снижает отношение чисел энергичных электронов и протонов
- При прямом выходе частиц из области вспышки этот эффект отсутствует.



- Характерное время жизни протонов ~ 300 с. (горизонтальный пунктир).

Заключение

- Задержка времени выхода в межпланетное пространство тяжёлых ускоренных частиц относительно вспышки объясняется не временем, требуемым для ускорения КВМ, а переносом частиц в магнитном жгуте до его пересоединения с открытыми структурами.
- По-видимому, неопределённости анализа дисперсии скоростей ионов, выполненного Д. Римсом, были недооценены из-за неучтённых эффектов их распространения.
- При переносе магнитным жгутом частиц, ускоренных во вспышке, отношение числа 0,5-МэВ электронов к числу 100-МэВ протонов может быть значительно снижено из-за быстрой потери энергии электронами на кулоновских столкновениях в жгуте.

Спасибо за внимание!

