Взаимосвязь длительных гамма-всплесков с быстрыми корональными выбросами массы и высокоэнергичными протонами

<u>В.И.Сидоров</u>^{1,2}, Ю.В.Кузьминых¹, С.А.Язев^{1,2}

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН; ²Астрономическая обсерватория ИГУ

Состояние проблемы:

- 1. Гамма-излучение вспышек связано с протонами высоких энергий
- 2. Существует зависимость флюенсов гамма-всплесков от скорости корональных выбросов массы (КВМ)
- 3. Гамма-всплески вызываются энергичными протонами, захваченными высокими (~200 Мм) корональными петлями
- 4. Гамма-эмиссию в ряде случаев можно представить в виде двух компонент: быстро спадающей и медленно спадающей



1. Гамма-излучение вспышек связано с протонами высоких энергий

Как показали Kanbach et al [1], *длительная гамма-эмиссия* вспышки 11 июня 1991г., с энергиями до 1 ГэВ, *имела* медленно спадающую *компоненту*, *обусловленную высокоэнергичными протонами*.

В начале 90-х годов по наблюдениям обсерваторий «Compton», «Гамма-1», «Гранат» был обнаружен новый класс вспышек с очень продолжительным высокоэнергичным гамма-излучением. Высокоэнергичное излучение, обусловленное распадом пионов, продолжалось от десятков минут до часов. Сильным аргументом в пользу протонного (ядерного) происхождения излучения служит регистрация на начальной фазе этих вспышек как ядерного гамма-излучения в линиях, так и нейтронов наземными установками [2].

- [1] Kanbach, G. et al. Detection of a long-duration solar gamma-ray flare on June 11, 1991 with EGRET on COMPTON-GRO //Astronomy and Astrophysics Supplement Series, (1993), vol. 97, № 1, p. 349-353.
- [2] Ю.Д.Котов. Особенности генерации высокоэнергичных излучений в солнечных вспышках и возможности спутникового проекта "КОРОНАС-ФОТОН" по их исследованию (на сайте МИФИ).

2. Существует зависимость флюенсов гамма-всплесков от скорости корональных выбросов массы **(**КВМ**)**

При вычислении коэффициентов корреляции потоков протонов в зависимости от линейной скорости КВМ, было получено, что для протонов с энергией выше 10 МэВ данный коэффициент составляет **0.75** и для >100 МэВ — около **0.5** [3]. При использовании множественной регрессии, когда в качестве зависимого параметра выбирается величина потоков протонов, а независимых — флюенс гамма-излучения и линейная скорость КВМ, коэффициент корреляции достигает

Как флюенсы гамма-излучения, так и скорость КВМ коррелируют с протонами СКЛ. Следовательно, флюенсы гамма-излучения и скорость КВМ коррелируют между собой.

последнем случае уровень значимости невысок из-за маленькой статистики [3].

0.92 для протонов с энергией выше 10 МэВ и **0.78** для >100 МэВ, но в

[3] Мягкова И.Н. и др. Геоэффективность солнечных вспышек, в которых было зарегистрировано гамма-излучение (период 2001-2005 гг.) // Труды XI Пулковской международной конференции по физике Солнца «Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений», С.-Петербург, 2007. с.261.

3. Какова природа длительных гамма-всплесков или каким образом энергичные протоны оказываются захваченными высокими корональными петлями?

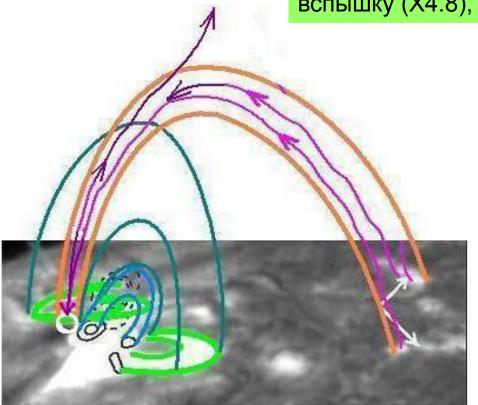
Как показали Kocharov et al [4], медленно спадающая (за 260 с) *компонента* гамма-эмиссии вспышки 24 мая 1990г. связана с петлями **~200** Мм. Ускоренные протоны были захвачены петлями и двигались внутри них.

В случае вспышки 15 июня 1991г., Kocharov et al [5] предполагают, что гаммаэмиссия, наблюдавшаяся в течение 2 часов после импульсной фазы вспышки,
имеет причину в релятивистских протонах, захваченных яркой магнитной аркой,
размерами ~ 1000 Мм.

- [4] Kocharov L. G. et al. Neutron and Electromagnetic Emissions during the 1990 May 24 Solar Flare // Solar Physics 155: 149, 1994.
- [5] Kocharov L. G. et al. Electromagnetic and Corpuscular Emission from the Solar Flare of 1991 June15: Continuous Acceleration of Relativistic Particles // Solar Physics 150: 267, 1994.

Предлагается концепция, основанная на эмпирических фактах и объясняющая существование длительных гамма-всплесков на постмаксимальной стадии мощных солнечных вспышек, сопровождающихся быстрым корональным выбросом массы (КВМ). Согласно концепции, в магнитных петлях на фронте КВМ могут генерироваться протоны с энергиями ~30 МэВ и поперечными питч-углами [6].

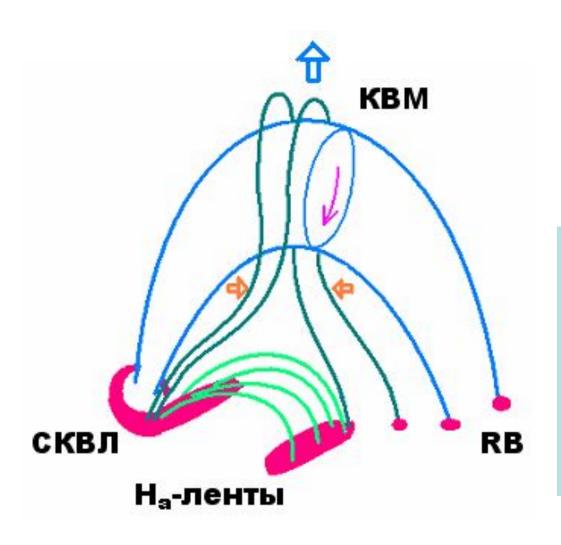
Схема события 23 июля 2002г., включавшего вспышку (Х4.8), и быстрый КВМ (скорость 2285 км/с).



Ускорение положительных ионов и электронов в эруптирующей корональной петле происходило, согласно [7], в противоположных направлениях.

- 6. Sidorov V.I., and Yazev S.A. Geomagnetism and Aeronomy, 2009, V.49, № 8, pp.1076-1079.
- 7. Зайцев В.В., Степанов А.В. Корональные магнитные арки. -Успехи физических наук. Т.178, №11, 2008, с.1165-1204.

Дрейф части захваченных в петлях КВМ *быстрых протонов* на уходящую поверхность КВМ. Там они могут быть захвачены в образующиеся, согласно модели CSHKP, вспышечные петли.

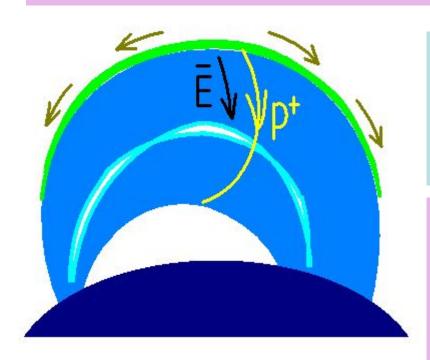


Красным цветом выделены вспышечные ленты, а также хромосферные основания коронального выброса [6]:

СКВЛ – структуры на концах вспышечных лент,

RB – удаленные уярчения вспышки (remote brightenings)

Чем вызывается дрейф ускоренных протонов на фронте КВМ?



Можно ли считать фронт КВМ уплотненной плазмой короны, обтекающей магнитную структуру быстрого КВМ (скорость 1÷2 Мм/с) на высотах до 2 солнечных радиусов?

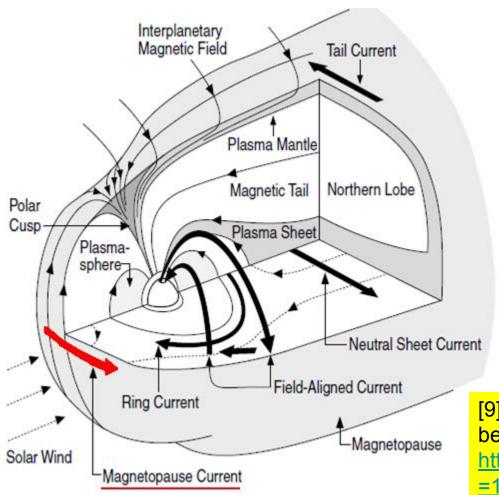
Учитывая характерный интервал высоты импульсного ускорения КВМ, время основного ускорения ~ минут, попадающее в интервал возможных значений времени магнитной диффузии 0.05÷500 с [7], можно ответить – ДА!

Некоторые типичные параметры КВМ на расстоянии в 1.5-2 солнечных радиуса [8]

Параметр\ структура	Фронт КВМ	Полость КВМ	Ядро КВМ
Плотность, см ⁻³	10 ⁸ ÷10 ⁹	(1÷3)·10 ⁶	
Магнитное поле, Гс	~1	неизвестно	до 100

[8] В.Д.Кузнецов в кн. «Плазменная гелиогеофизика». Т.1, 2009, с.86-90.

Аналогия с земной магнитосферой



Аналогия – электрический ток, бегущий по магнитопаузе магнитосферы Земли [9], представляющий собой дрейф заряженных частиц с экваториальными питч-углами

[9] Из книги "The Sun to the Earth – and beyond: panel reports", 2003 http://www.nap.edu/openbook.php?record_id = 10860

FIGURE 2.2 A cutaway diagram of Earth's magnetosphere. Courtesy of C.T. Russell, University of California, Los Angeles.

4. Как объяснить две компоненты гамма-эмиссии:

быстро спадающую - в **е** раз за характерное время 25 минут и медленно спадающую - в **е** раз за характерное время 255 минут?

Эти две компоненты гамма-эмиссии можно интерпретировать как вызванные протонами близких энергий, но захваченными топологически разными магнитными структурами:

- арками КВМ (быстро падающая компонента эмиссии),
- и высокими вспышечными петлями (медленно падающая компонента эмиссии).

В первом случае, падение интенсивности излучения обусловлено уходом протонов от Солнца вместе с быстрым КВМ за характерное время ~десятки минут.

Во втором случае, – длительным сохранением ускоренных протонов с поперечными питч-углами в медленно эволюционирующих высоких корональных послевспышечных петлях с малой плотностью плазмы.

Из сценария следует объяснение:

- 1) корреляции потоков протонов СКЛ с линейной скоростью КВМ [3],
- 2) корреляции потоков протонов СКЛ с флюенсами гамма-всплесков [3],
- 3) зависимость флуенсов гамма-всплесков от скорости КВМ.
- 1) При большей скорости КВМ сохраняется больший процент ускоренных протонов в магнитных арках КВМ, из-за меньшего времени высыпания протонов на хромосферу (при большой, но конечной длине их свободного пробега).
- 2) Чем больше протонов вблизи Солнца, вызывающих при высыпании в плотную атмосферу гамма-всплеск, тем больше их уносится выбросом в гелиосферу. Это возможно, если в разных событиях распределение протонов по питч-углам не сильно отличается.
- 3) При большей скорости КВМ более эффективен дрейф протонов на уходящую поверхность КВМ и переход их на высокие вспышечные петли, и дальнейшее высыпание их в плотную атмосферу, сопровождающееся гамма-эмиссией.
- [3] Мягкова И.Н. и др. Геоэффективность солнечных вспышек, в которых было зарегистрировано гамма-излучение (период 2001-2005 гг.) // С.-Петербург, 2007. с.261.

Таким образом,

- 1. Предложен сценарий, в котором ускоренные в магнитных арках быстрых КВМ протоны дают наблюдаемые феномены: а) протоны солнечных космических лучей, б) гамма-источники двух типов с медленным и быстрым падением интенсивности.
- 2. Быстрое падение интенсивности гамма-источника обусловлено уходом от Солнца магнитной арки с протонами в составе быстрого КВМ.
- 3. Медленное падение интенсивности гамма-источника обусловлено дрейфом протонов из магнитных арок КВМ на высокие вспышечные петли.
- 4. Высокие послевспышечные корональные петли, размерами ~200 Мм, содержащие ускоренные протоны в течение нескольких часов после импульсной фазы вспышки, образованы пересоединением противоположных магнитных потоков после прохождения коронального транзиента (по CSHKP).
- 5. Указанные корональные петли опираются одним основанием на гаммаисточник вблизи сильных магнитных полей АО, другим - на удаленные хромосферные уярчения, проявляющиеся вблизи максимума вспышки.