

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

В.И.Сидоров^{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 **0.92** для протонов с энергией выше 10 МэВ и **0.78** для >100 МэВ, но в последнем случае уровень значимости невысок из-за маленькой статистики [3].

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

[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.

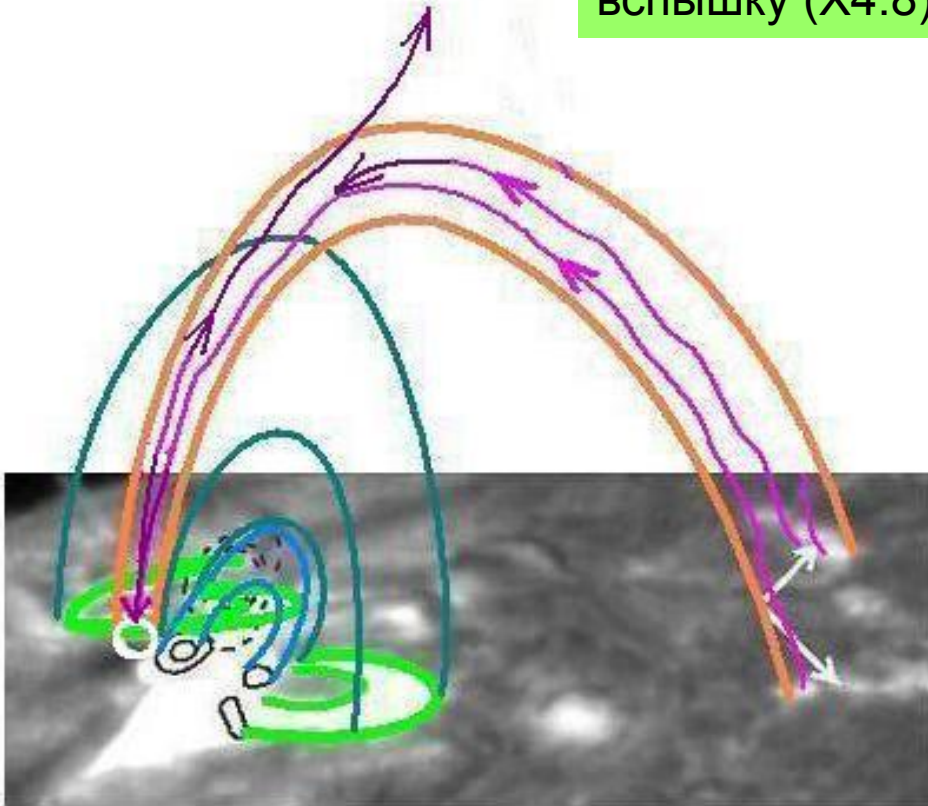
В случае вспышки 15 июня 1991г., Kocharov et al [5] предполагают, что *гамма-эмиссия*, наблюдавшаяся в течение 2 часов после импульсной фазы вспышки, *имеет причину в релятивистских протонах, захваченных яркой магнитной аркой, размерами ~ 1000 Мм.*

[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 June 15: 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 (X4.8), и быстрый КВМ (скорость 2285 км/с).

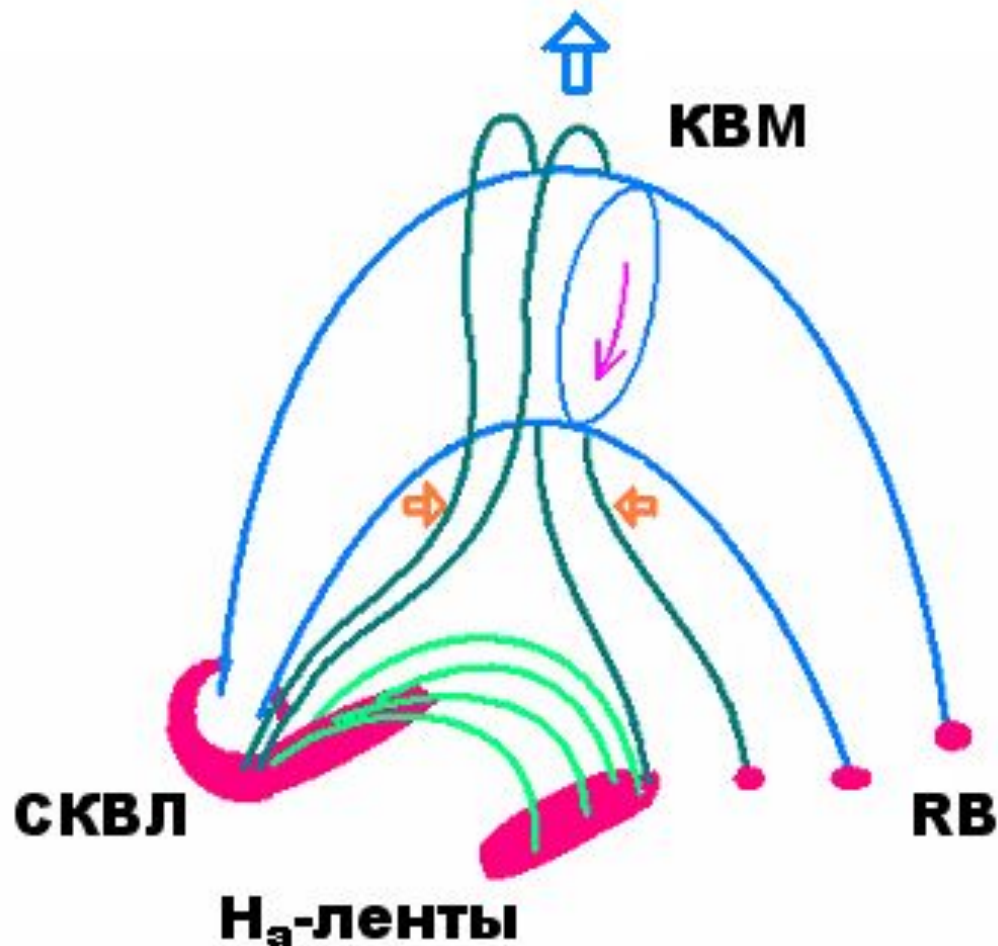


Ускорение положительных ионов и электронов в эруптирующей корональной петле происходило, согласно [7], в противоположных направлениях.

6. Sidorov V.I., and Yazev S.A. Geomagnetism and Aeronomy, 2009, V.49, № 8, pp.1076-1079.

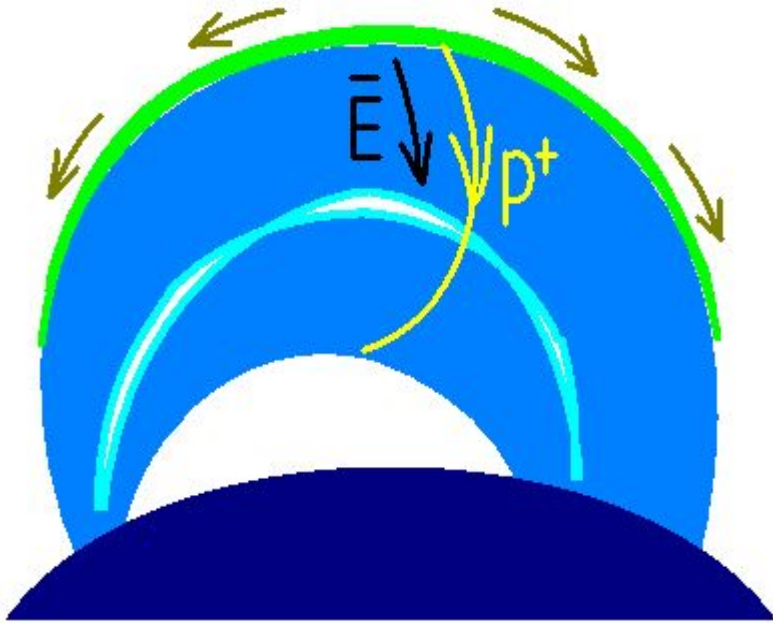
7. Зайцев В.В., Степанов А.В. Корональные магнитные арки. -Успехи физических наук. Т.178, №11, 2008, с.1165-1204.

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 (**r**emote **b**rightenings)

Чем вызывается дрейф ускоренных протонов на фронте КВМ?



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

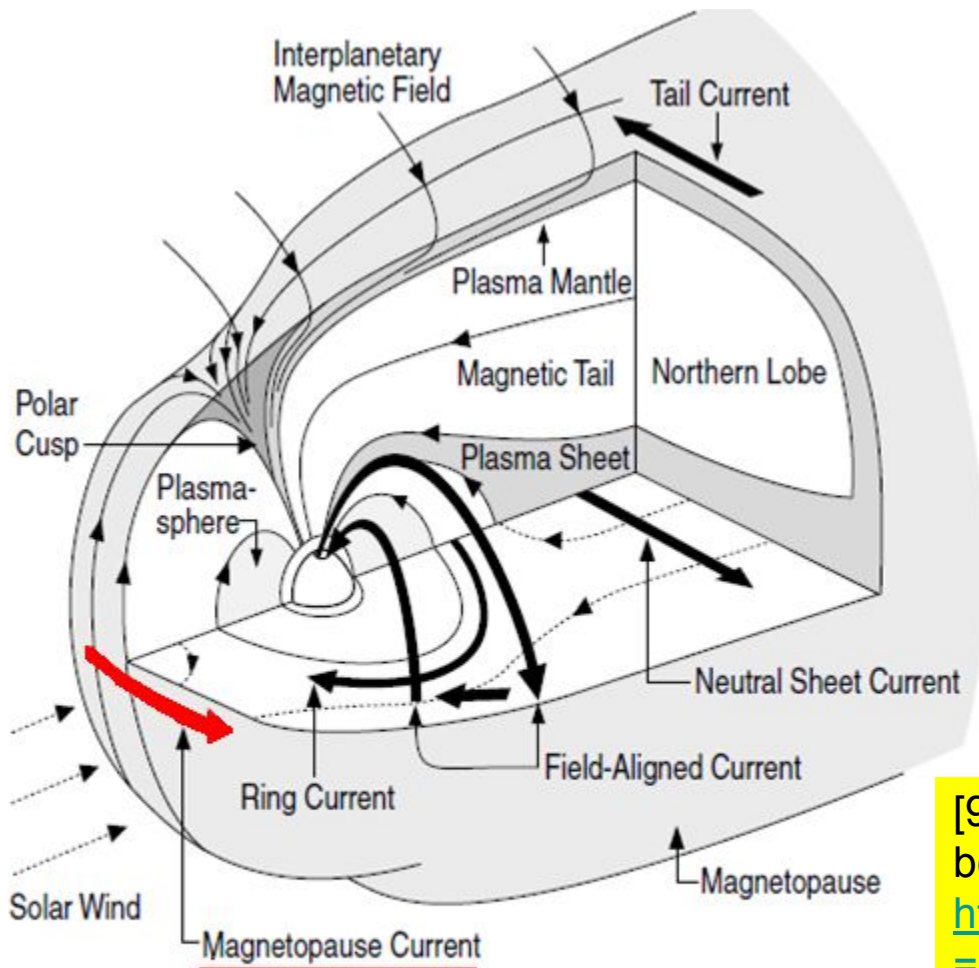
Учитывая характерный интервал высоты импульсного ускорения КВМ, время основного ускорения \sim минут, попадающее в интервал возможных значений времени магнитной диффузии $0.05 \div 500$ с [7], можно ответить – **ДА!**

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

Параметр\ структура	Фронт КВМ	Полость КВМ	Ядро КВМ
Плотность, см ⁻³	$10^8 \div 10^9$	$(1 \div 3) \cdot 10^6$	
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 пичч-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 e раз за характерное время 25 минут и медленно спадающую - в e 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 пич-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 большóй, 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 вспыхивающие петли.
4. Высокие послевспыхивающие 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 гамма-источник вблизи сильных магнитных полей АО, другим - на удаленные хромосферные уярения, проявляющиеся вблизи максимума вспышки.