



О СВЯЗИ УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ПРОТОНОВ ДО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ С ПРОЦЕССОМ МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ В ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗЕ ЭРУПТИВНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ


Курт В.Г.¹, Юшков Б.Ю.¹, Галкин В.И.².

1. НИИЯФ МГУ, 2. Физический ф-т МГУ

г. Москва, Россия, vgk@srd.sinp.msu.ru

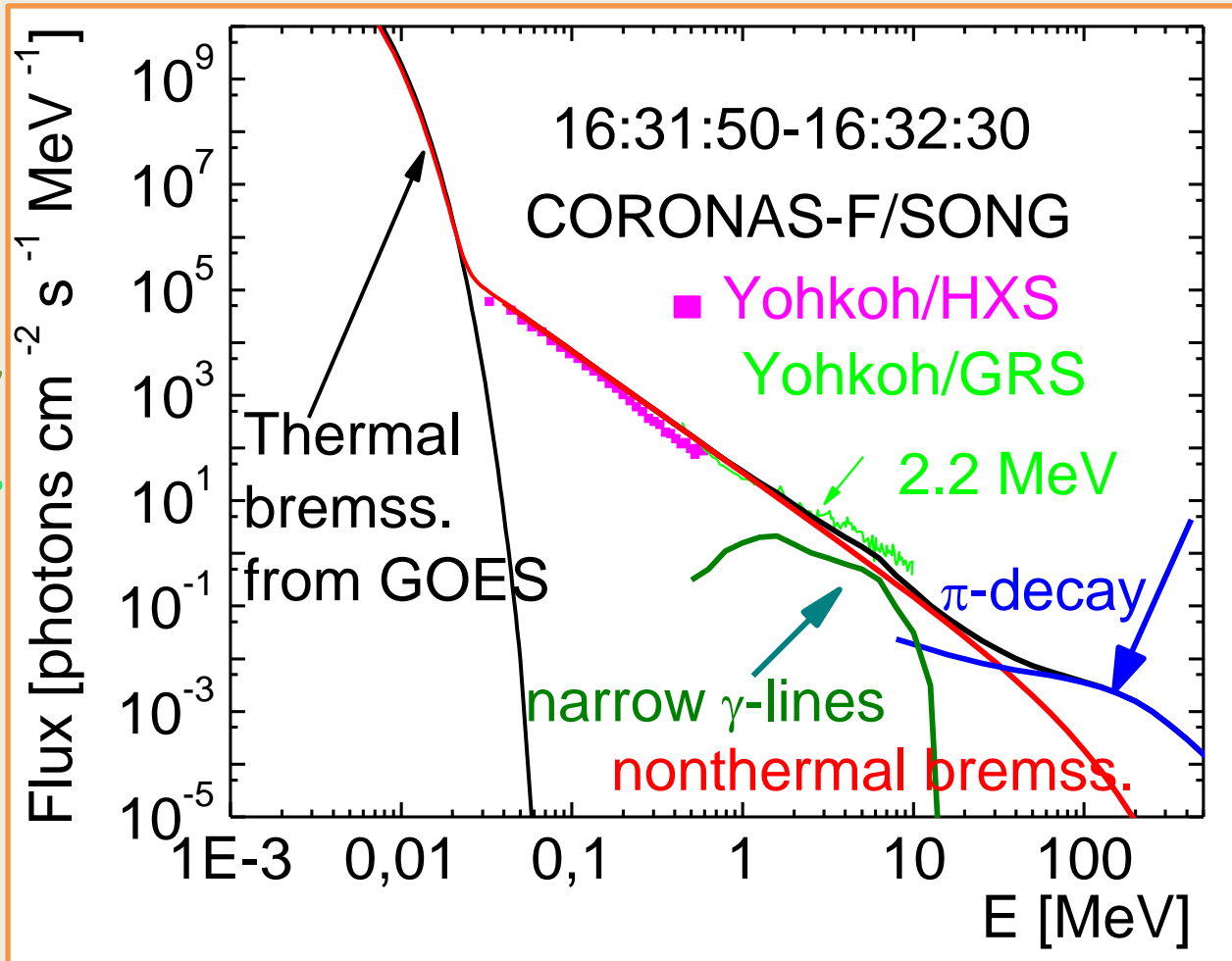
 Ускорение частиц до высоких энергий и нагрев плазмы в импульсной фазе солнечной вспышки представляют собой следствия магнитного пересоединения в короне.

 Гамма-излучение от энергичных ионов и электронов было обнаружено и подробно измерено до энергии 100 МэВ-ГэВ с 1980 года в импульсной фазе не более чем в 15 эруптивных событиях.

 Измерения гамма-излучения предоставляют нам единственное прямое (хотя и вторичное) знание о свойствах ускорителей, действующих в солнечной вспышке

Композитный спектр в максимуме вспышки 2001-08-25 (S21 E38 3N /X 5.3), полученный на основе измерений КОРОНАС/СОНГ

Radiation
Mechanisms
Electron Bremss.
Nuclear De-
excitation Lines
(e.g. 4.428 MeV,
6.129 MeV)
Neutron Capture
Line
(2.223 MeV
Photosphere
Pion-Decay
Gamma-Rays



ИЗВЕСТНО


- ↕ протоны (ионы) с энергиями 5-50 МэВ, отвечающие за возбуждение γ -линий, могут быть ускорены в самом начале импульсной фазы вспышки, одновременно с электронами;
- ↕ временной ход и I_{max} гамма-линий хорошо коррелируют с временным ходом и I_{max} торм. излучения с энергиями $>200-300$ keV.

(Shih, A Y., Lin, R.P., & Smith, D.M. 2009, ApJ, 698, L152; Kurt, V.G., Yushkov, B.Yu, Galkin, V.I., Kudela, K., & Kashapova, L.K. 2017, New Astron. 56, 102; Victoria G. Kurt, Astrid M. Veronig, Boris Yu. Yushkov et al., in preparation)

ИСТОРИЯ регистрации «пионного» излучения:

1. Впервые достоверно было обнаружено как в импульсной фазе, так и после ее окончания во вспышке 1982-06-03 (SMM/GRS) (Chupp et al. 1973, Nature, 241, 333)
2. В период с 1982 по 1991 это излучение было измерено в нескольких событиях как в импульсной фазе, так и как «Late-phase >100 MeV Gamma-Ray Emission» эруптивных событий.
3. КОРОНАС-Ф/СОНГ зарегистрировал π -decay emission в импульсной фазе 5 вспышек: 2001-08-25 (X5.3); 2003-10-28 (X17); 2003-10-29 (X10); 2003-11-04 (X28); 2005-01-20 (X8)
4. 2008 г . - запущен *Fermi*/LAT. Первая импульсная вспышка - 2010-06-12. Затем несколько импульсных событий и >30 «Late-phase >100 MeV Gamma-Ray Emission in Solar Eruptive Events»

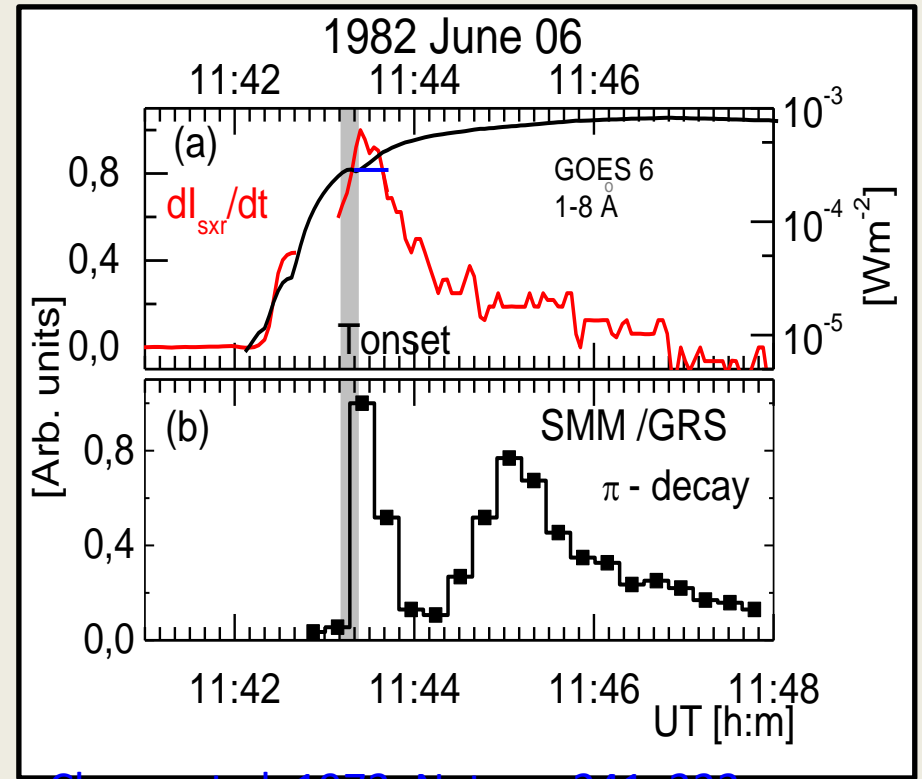
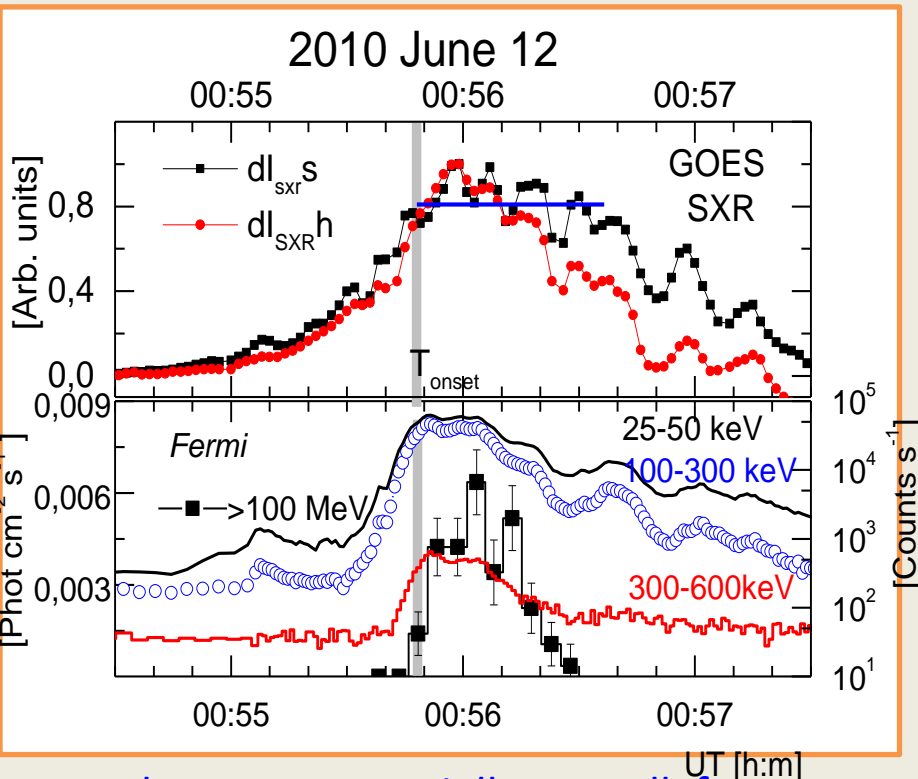
I. ПИОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ не было выделено в спектре вспышки в первых эпизодах ускорения:

 в первых зарегистрированных 5 событиях (1982-1991). ([Forrest, D.J., & Chupp, E.L. 1983, Nature, 305, 291](#); [Vilmer, N. 1994, ApJS, 90, 611](#); [Terekhov, O.V., Sunyaev, R.A., Tkachenko, A.Yu., et al. 1996, Astron. Lett., 22, 143](#); [Kurt, V., Akimov, V., & Leikov, N. 1996, AIPC, 374, 237](#));

 в 5 событиях, измеренных прибором СОНГ;

 в событиях, измеренных Fermi/LAT до настоящего времени.

II. Сопоставление времени начала регистрации пионного излучения с временем максимального энерговыделения вспышки.

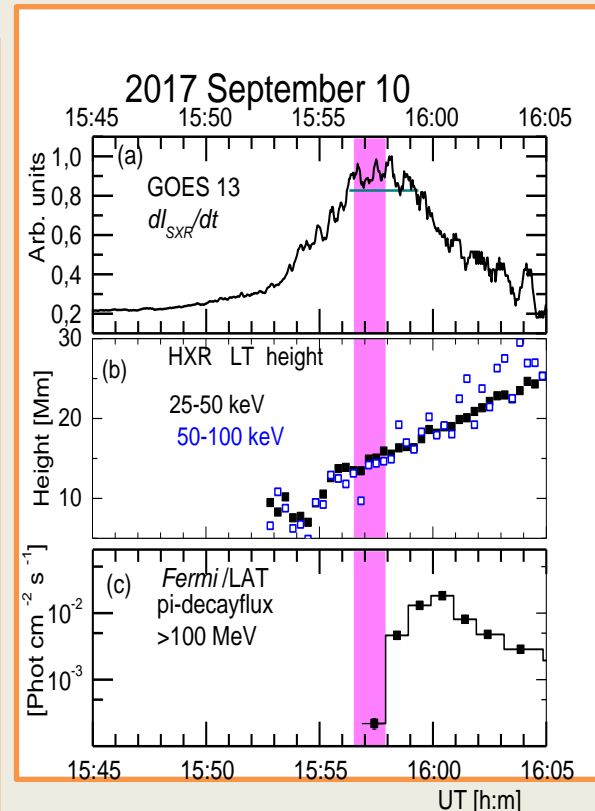
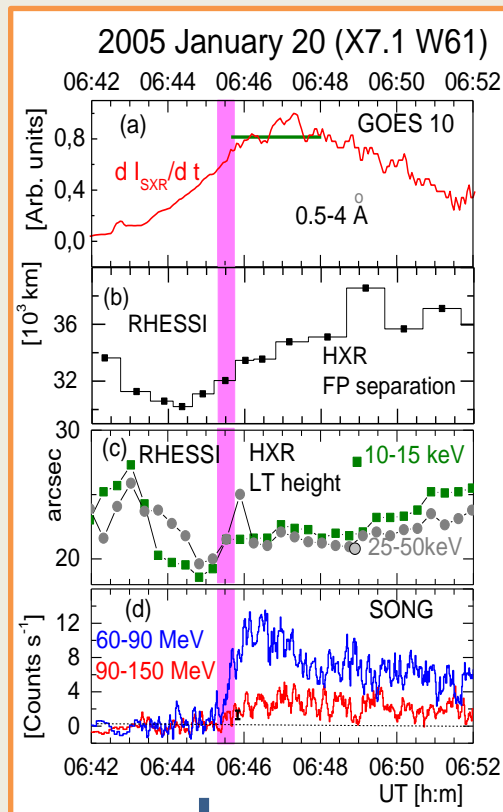
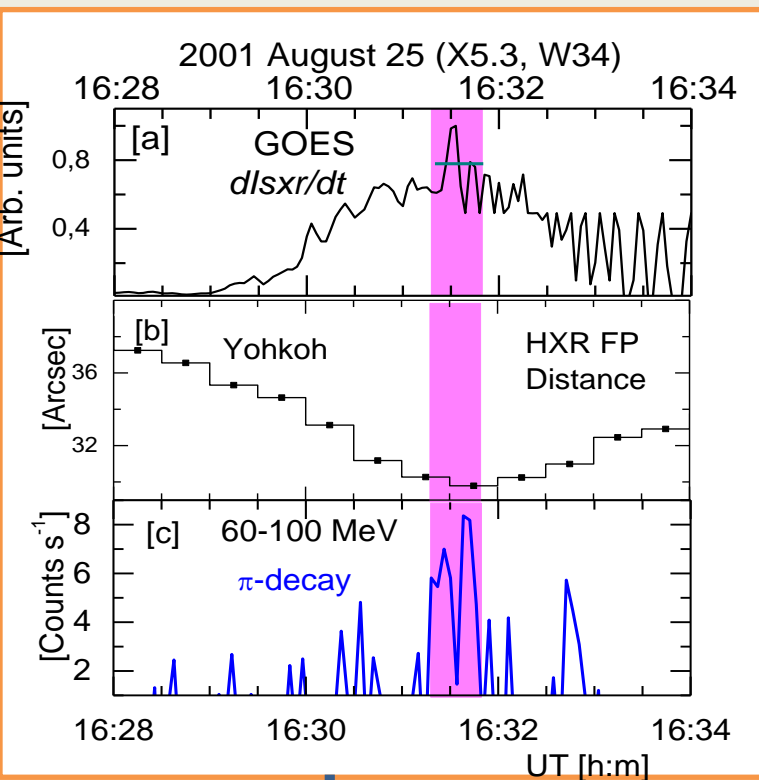


Ackermann, M., Ajello, M., Allafort, A., et al. 2012. *ApJ*. 745. 144

Chupp et al. 1973, *Nature*, 241, 333

Независимо от чувствительности детектора и длительности импульсной фазы пионное излучение начиналось после момента времени **T_1** , когда **dI_{sxr}/dt** превышало значение **$0.8 I_{max}$**

III. Сопоставление времени начала регистрации пионного излучения с изменениями расстояния HXR FP и высотой HXR LT source



Благодарим В. Гречнева и Л. Кашапову за обработку пространственных измерений HXR

Kurt, V., Belov, A., Kudela, K., Mavromichalaki, H., et al. 2019, Sol. Phys., 294, 22

IV. **Forbes & Lin (2000)** вывели простое соотношение между скоростью глобального пересоединения и движением лент поперек магнитного поля B_n , наблюдаемым в H α и/или EUV :

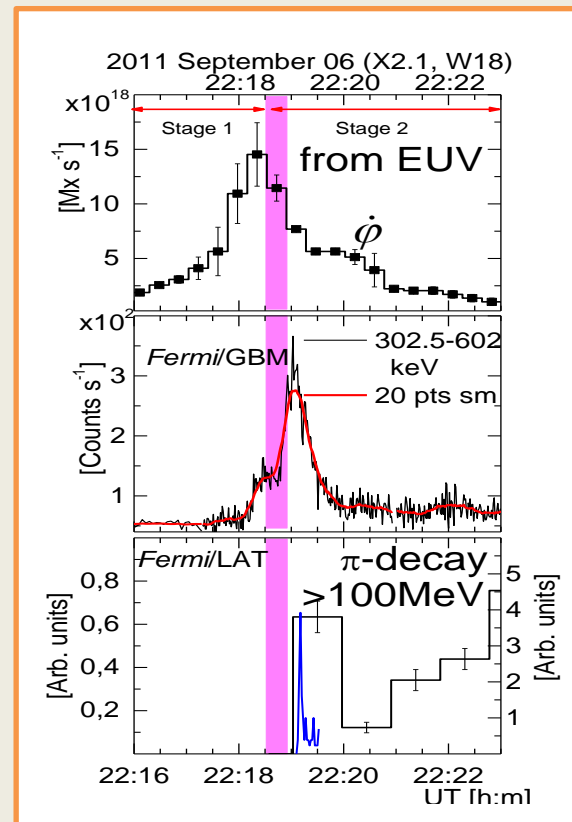
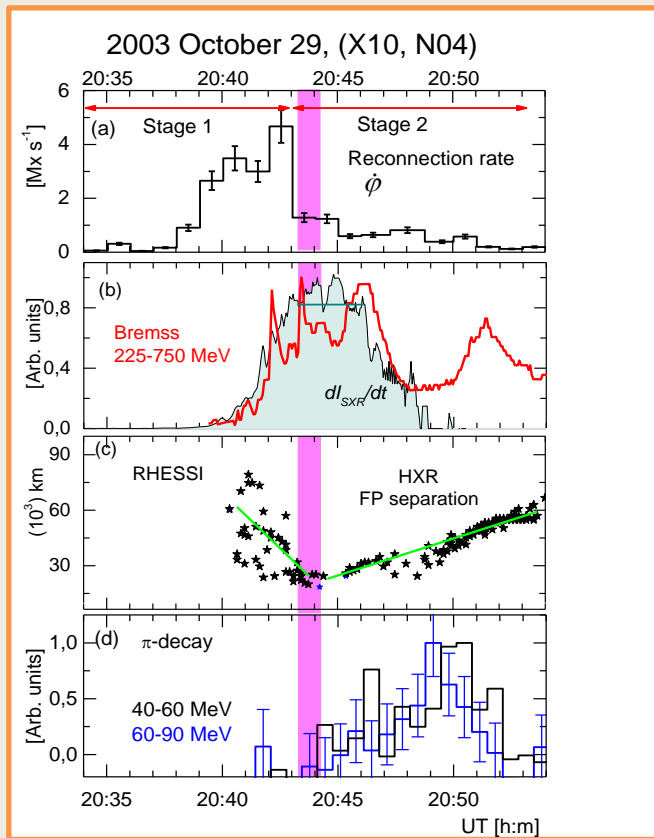
$$\frac{d\phi}{dt} = \int B_n(a) da$$

В стандартной модели вспышки $d\phi/dt$ сопоставляют с мощностью энерговыделения $d\varepsilon/dt$.

($I_{HXR} < 100$ кэВ, I_{SXR} , dI_{SXR}/dt рассматривают как «проху» энерговыделения вспышки).

Miklenic et al. 2009; Qiu (2009); Qiu et al. (2010) обнаружили, что пик скорости пересоединения опережает основной пик HXR на несколько минут в нескольких двухленточных эруптивных вспышках.

IV. Сопоставление времени начала пионного излучения и временным поведением скорости магнитного пересоединения $d\phi/dt(t)$.



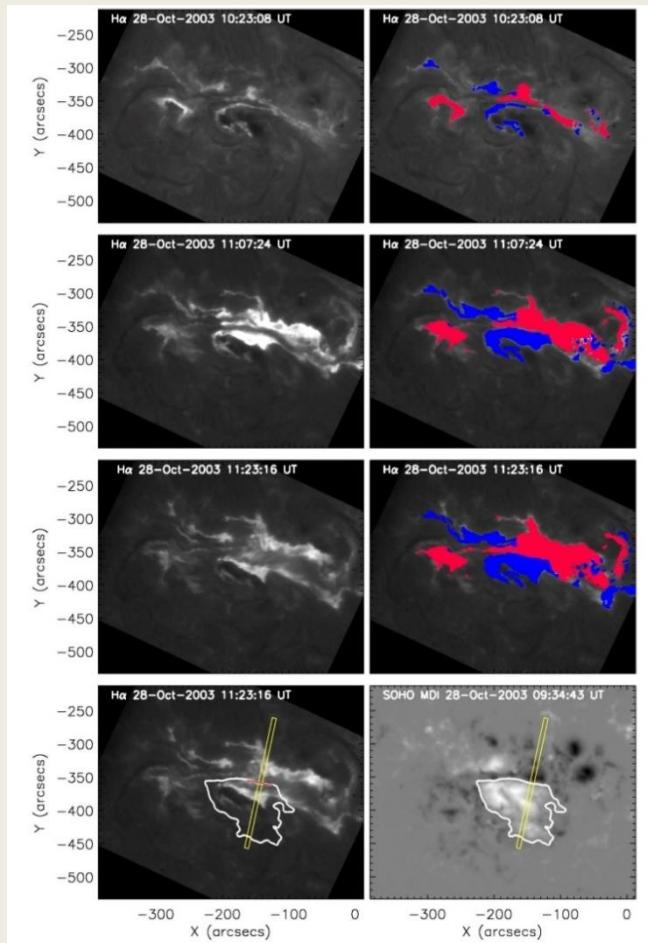
Вспышка
четко
разделяется
на две
стадии.

**ИЗ подготовленной статьи: TOWARD
UNDERSTANDING THE HIGH ENERGY PARTICLES
ACCELERATION YIELD IN COMPARISON WITH
MAGNETIC RECONNECTION PROCESS
OF THE 2003 OCTOBER 28 (X17) SOLAR FLARE**

*Victoria G. Kurt¹, Astrid M. Veronig^{2,3}, Boris Yu. Yushkov¹, Johannes
Tschernitz², Jürgen Hinterreiter^{2,4}, Vladimir I. Galkin⁵*

2003 October 28 (X17.2, E08)

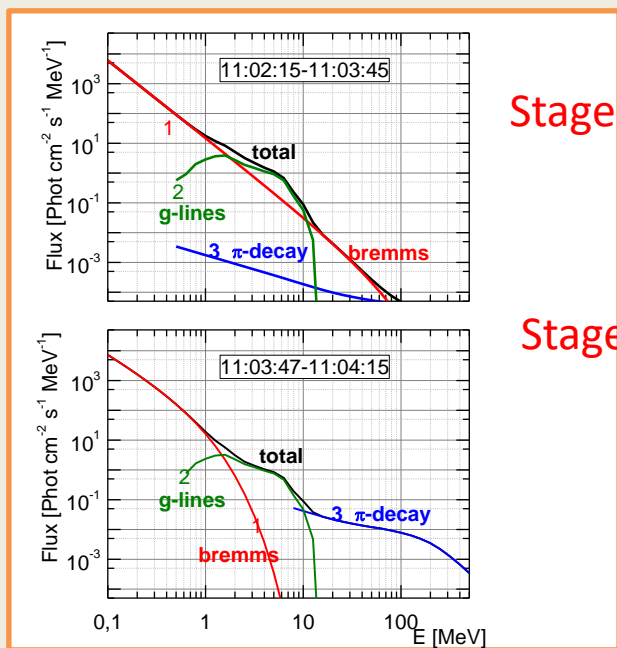
. Evolution of the 2003 October 28 flare observed by the USO H α telescope for four different time steps covering the start, maximum and decay phase of the flare (left panels). In the right panels, the total flare ribbon area detected up to the respective recording time of the image is overplotted, separately in blue/red for the positive/negative magnetic polarities. In the bottom panels, we outline the flare PIL (white contour) derived from the corresponding pre-flare MDI LOS magnetic map shown in the right bottom panel. Narrow yellow rectangle in the bottom panels **indicates one direction perpendicular to the local PIL segment.**



Из подготовленной статьи: TOWARD UNDERSTANDING THE HIGH ENERGY PARTICLES ACCELERATION YIELD IN COMPARISON WITH MAGNETIC RECONNECTION PROCESS OF THE 2003 OCTOBER 28 (X17) SOLAR FLARE

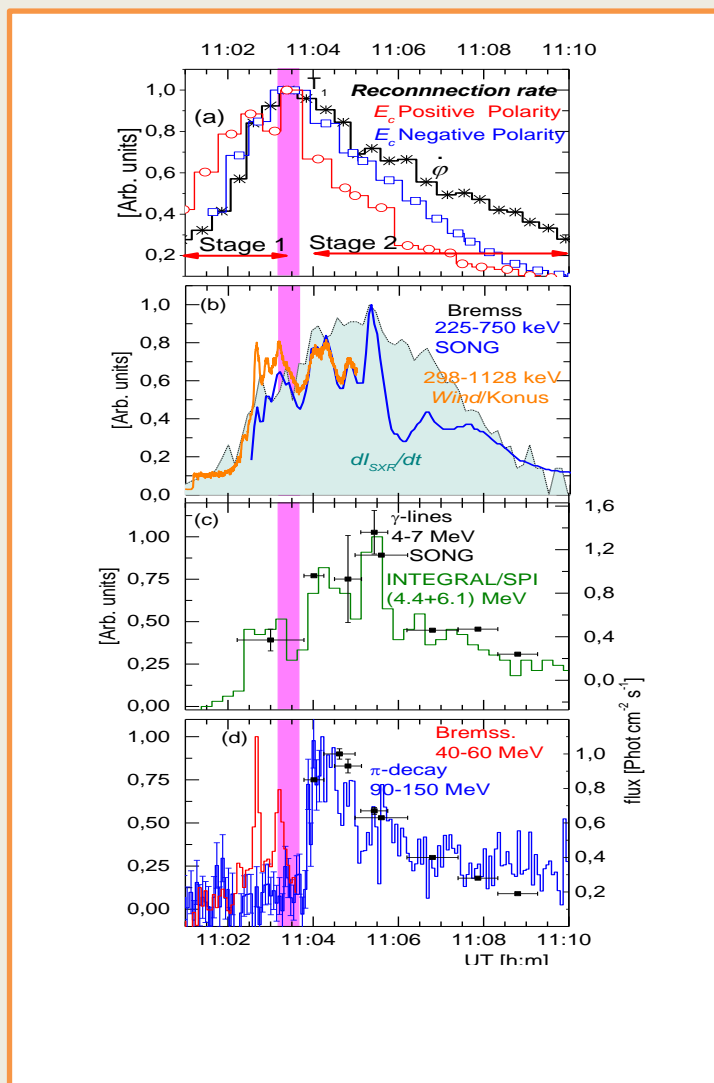
Victoria G. Kurt¹, Astrid M. Veronig^{2,3}, Boris Yu. Yushkov¹, Johannes Tschernitz², Jürgen Hinterreiter^{2,4}, Vladimir I. Galkin⁵

Спектры SONG



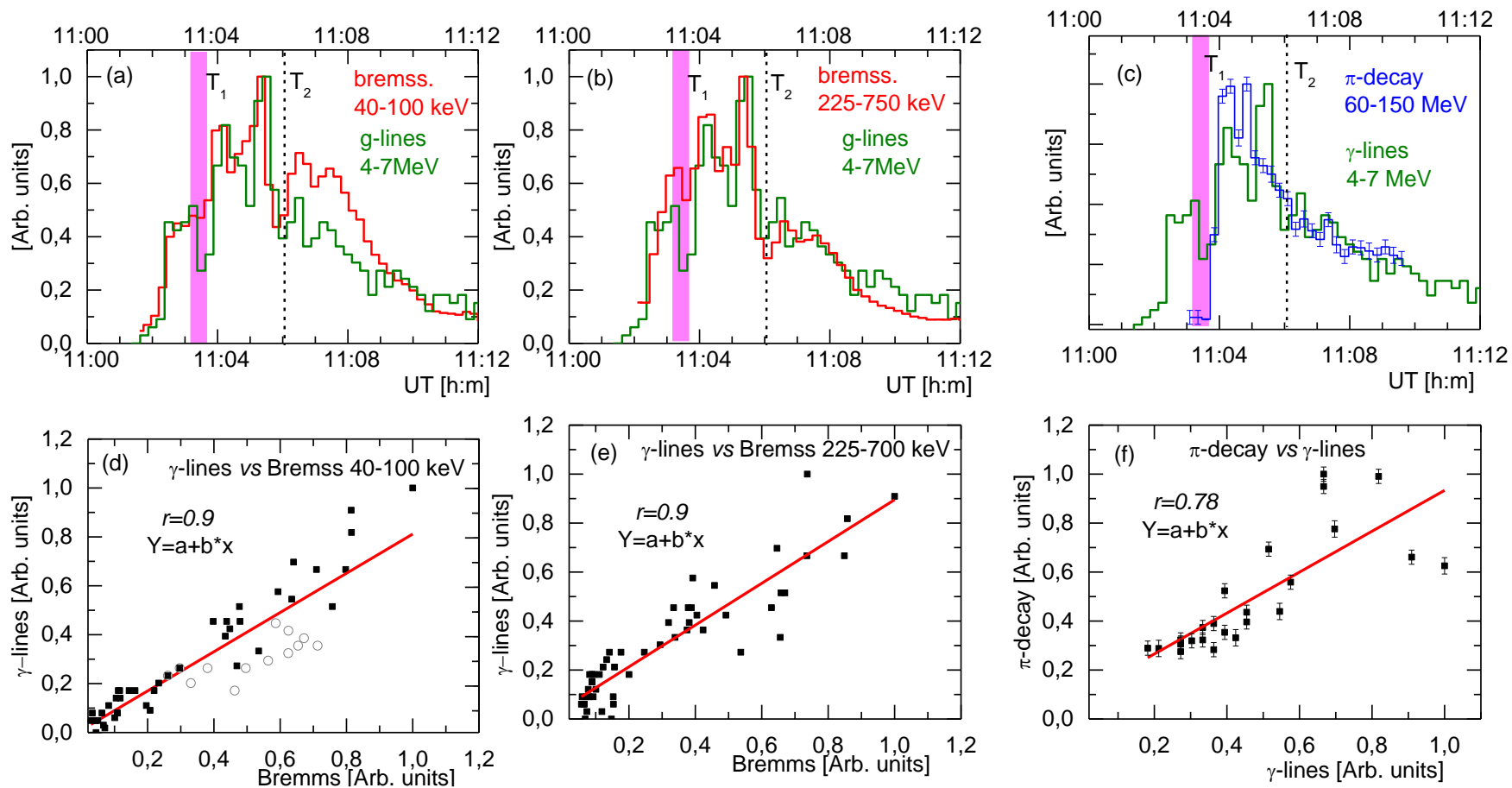
Stage 1

Stage 2

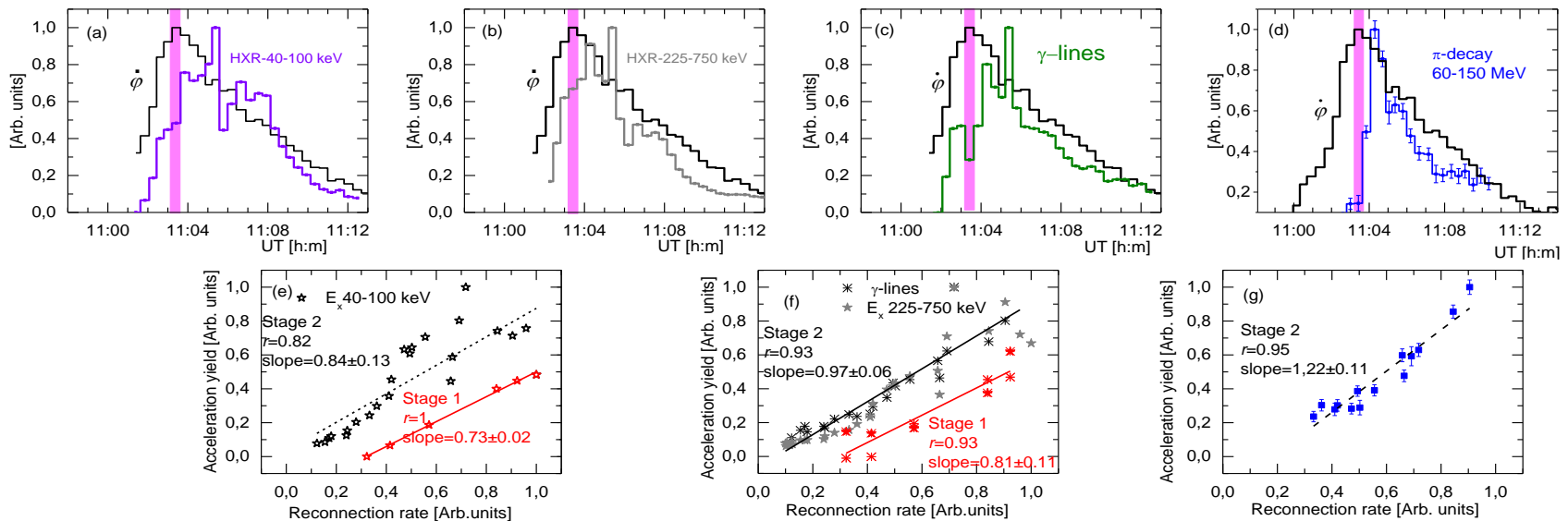


Вспышка 2003-10-28 – уникальное событие: поток тормозного излучения на $E \sim 60$ МэВ, π -decay emission были самыми большими, когда –либо зарегистрированными в солнечной вспышке.

Сопоставление различных излучений, зарегистрированных во ВСПЫШКЕ



Глобальная скорость пересоединения магнитного потока в сравнении с эффективностью ускорения электронов и протонов разных энергий



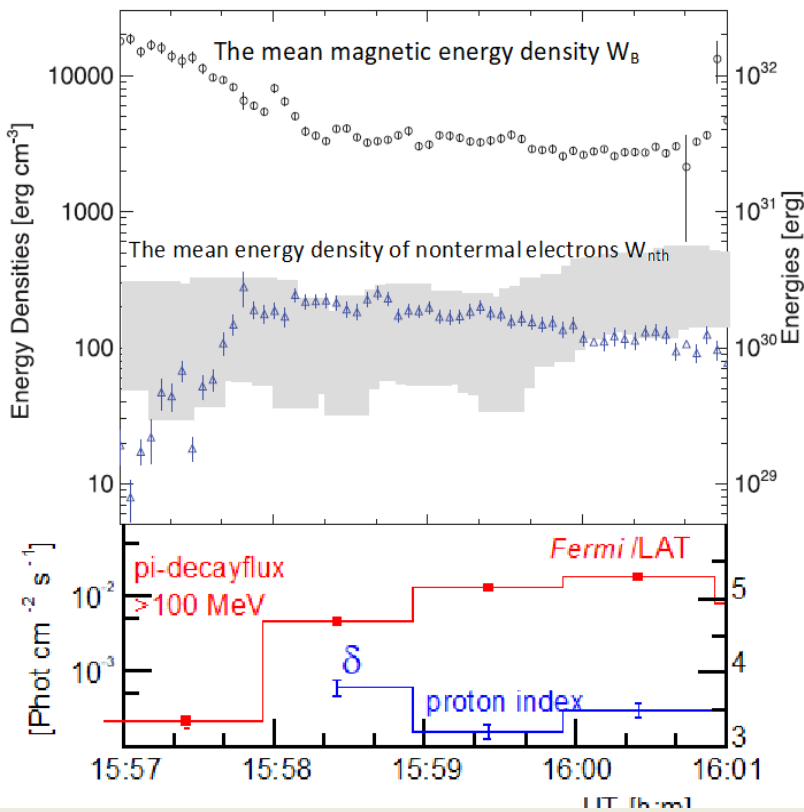
Эффективность ускорения пропорциональна скорости пересоединения магнитного потока, однако кардинально различна в первой и второй стадиях.

КАКИЕ ПРОЦЕССЫ УСКОРЕНИЯ РЕАЛИЗУЮТСЯ В КАЖДОЙ ИЗ НИХ??

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Gregory D. Fleishman^{1*}, Dale E. Gary¹, Bin Chen¹, Natsuha Kuroda^{2,3}, Sijie Yu¹, Gelu M. Nita¹

2017 September 10 (W95)



Solar flares are powered by a rapid release of energy in the solar corona, thought to be produced by the decay of the coronal magnetic field strength. Direct quantitative measurements of the evolving magnetic field strength are required to test this. We report microwave observations of a solar flare, showing spatial and temporal changes in the coronal magnetic field. The field decays at a rate of ~ 5 Gauss per second for 2 minutes, as measured within a flare subvolume of $\sim 10^{28}$ cubic centimeters. This fast rate of decay implies a sufficiently strong electric field to account for the particle acceleration that produces the microwave emission. The decrease in stored magnetic energy is enough to power the solar flare, including the associated eruption, particle acceleration, and plasma heating.

2020, Science, 367, 278

Omodei, N., Pesce-Rollins, M., Longo, F., Allafort, A., & Krucker, S. 2018, ApJ, 865, L7