39-Я ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО КОСМИЧЕСКИМ ЛУЧАМ
ВККЛ-2026

НИИЯФ МГУ

УСКОРЕНИЕ ПРОТОНОВ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ 28 ОКТЯБРЯ 2003 Г. ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Б.Ю.Юшков (НИИЯФ МГУ)

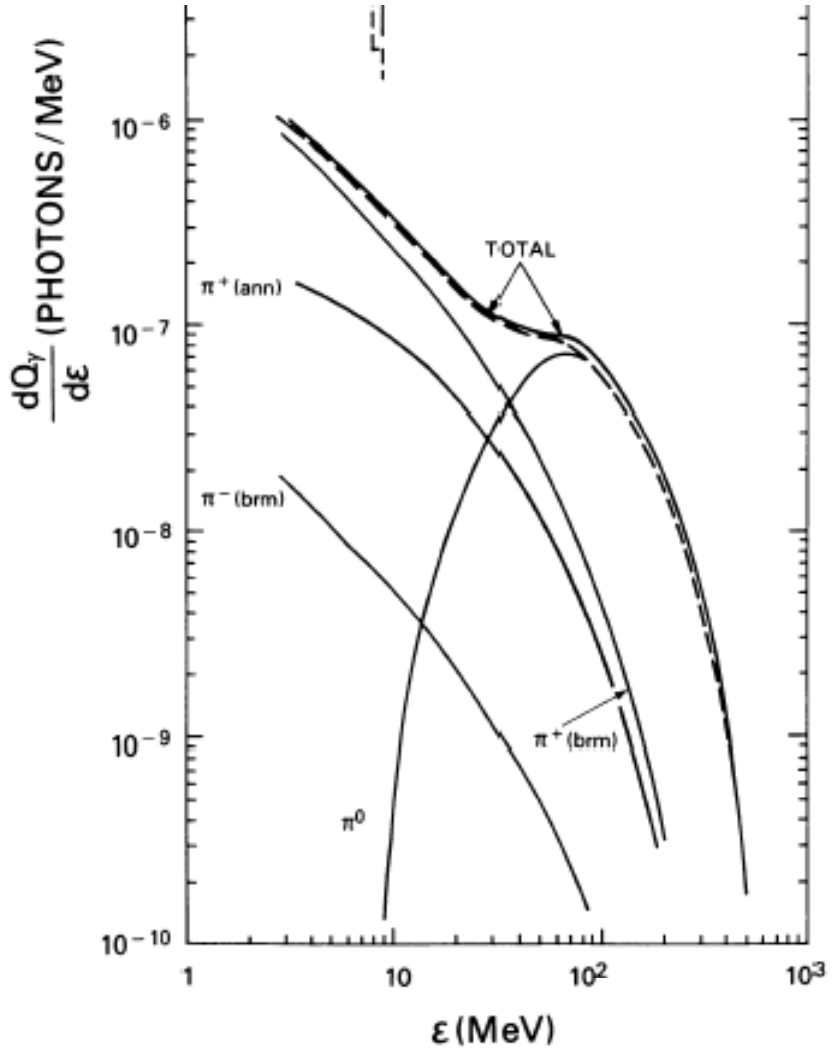
clef@srd.sinp.msu.ru

Ускорение протонов до высоких энергий во время солнечных вспышек до сих пор является открытым вопросом. Наблюдаемые на 1 а.е. потоки протонов искажены при распространении в межпланетном пространстве.

Один из способов решения проблемы - исследование высокоэнергичного гамма-излучения. Это излучение возникает в результате распада нейтральных и заряженных пионов и характеризуется спектральной особенностью в области 30-100 МэВ.

.

Спектр гамма-излучения

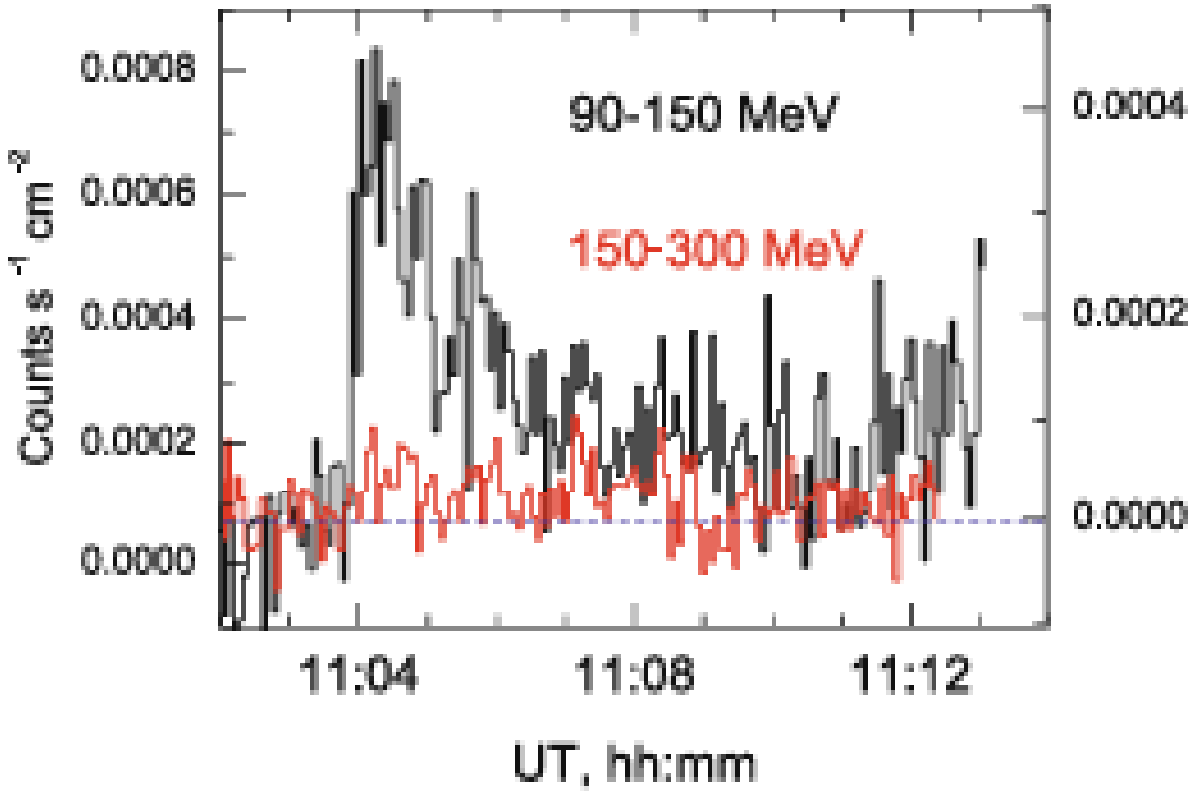


$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm}$$

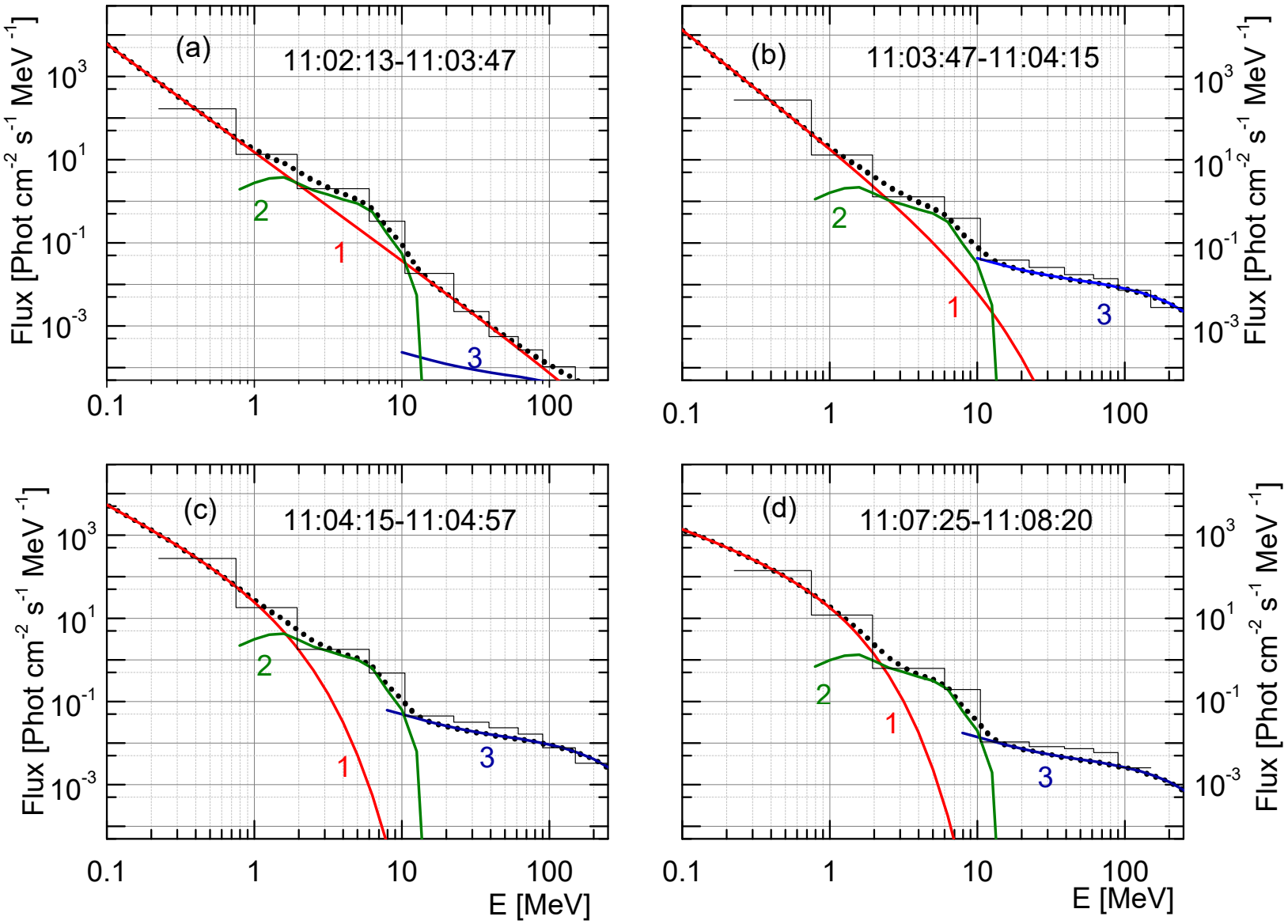
$$\pi^{0} \rightarrow 2\gamma$$

Murphy, R.J., Dermer, C.D., Ramaty, R. High-energy processes in solar flares // 1987 *Astrophys. J. Suppl.*, **63**, 721-748.

Такое гамма-излучение было зарегистрировано во время мощной (X17.2) солнечной вспышки 28 октября 2003 года прибором СОНГ на борту ИСЗ КОРОНАС-Ф.



Kuznetsov S.N., Kurt V.G., Yushkov B.Yu., Kudela K., Galkin V.I., // Solar Physics. 2011. V.268, p. 175


(a)
11:02:13-11:03:47
(b)
11:03:47-11:04:15
(c)
11:04:15-11:04:57
(d)
11:07:25-11:08:20
1
2
3
Flux [Phot cm^{-2} s^{-1} MeV^{-1}]
E [MeV]
0.1
1
10
100
10^{3}
10^{1}
10^{-1}
10^{-3}

Evidence of prolonged acceleration of solar protons in average electric fields less than

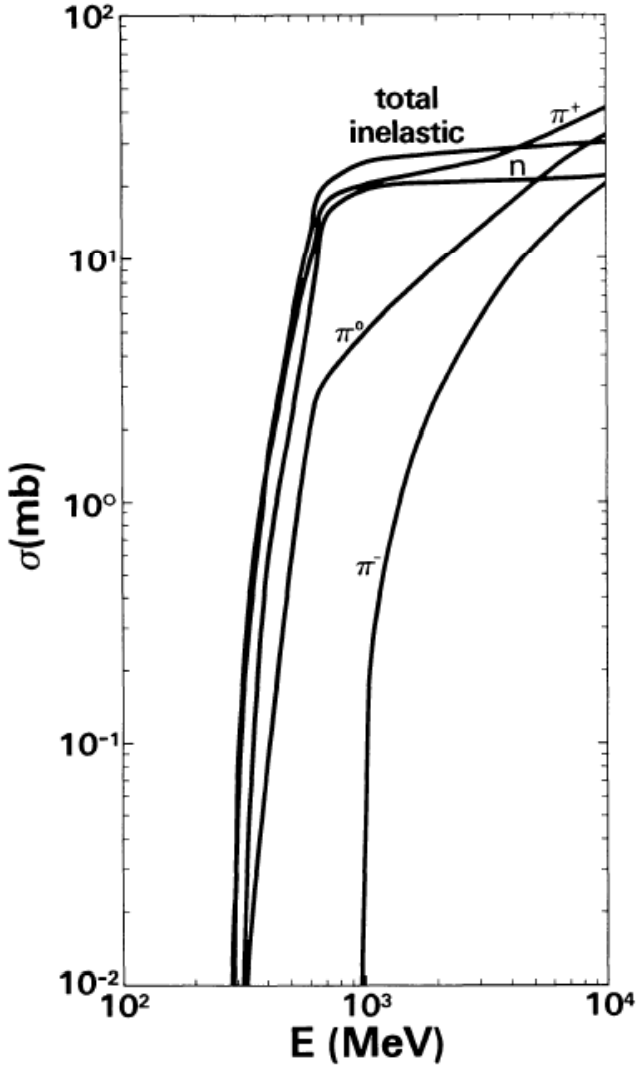
4 10^{-4} V/cm

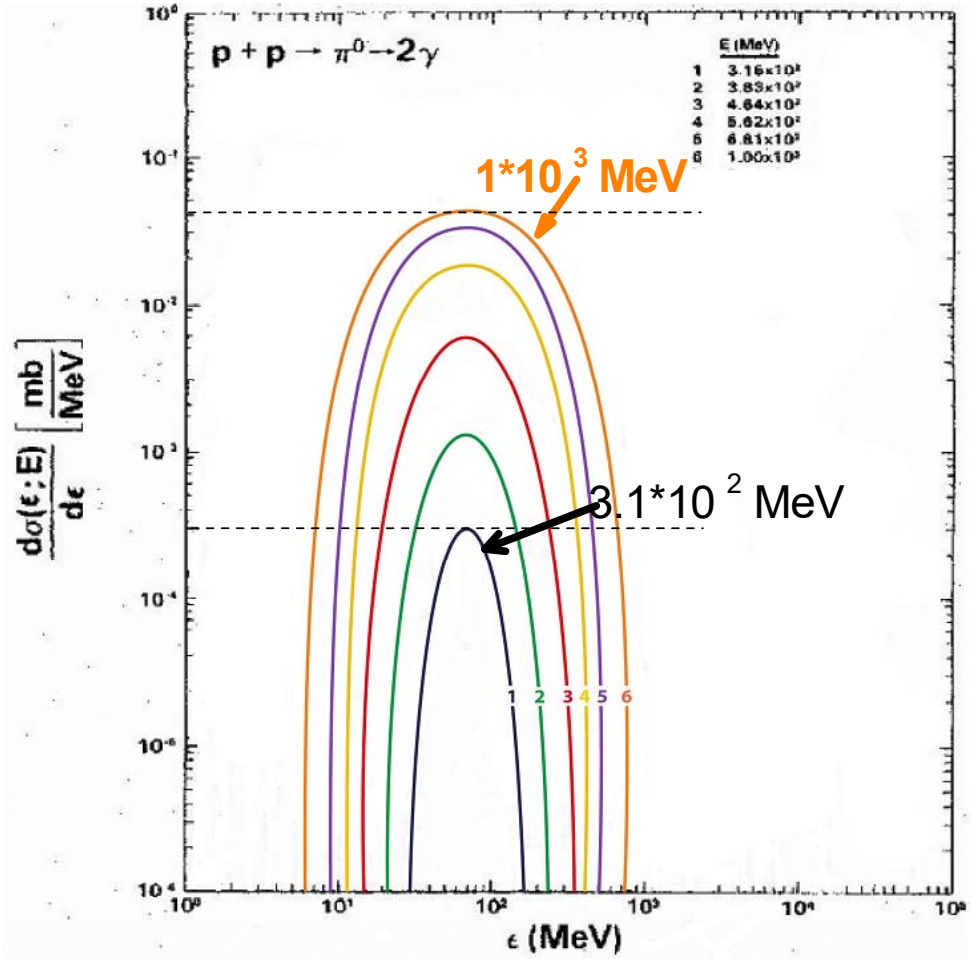
Struminsky A.B., Ozheredov V.A., Sadovskii A.M., Shlyk N.S., Belov A.V., Abunina M.A., Grigorieva I.Yu. // Advances in Space Research, 2025. V. **76**, P. 7564

Темп ускорения протонов Электрическое поле

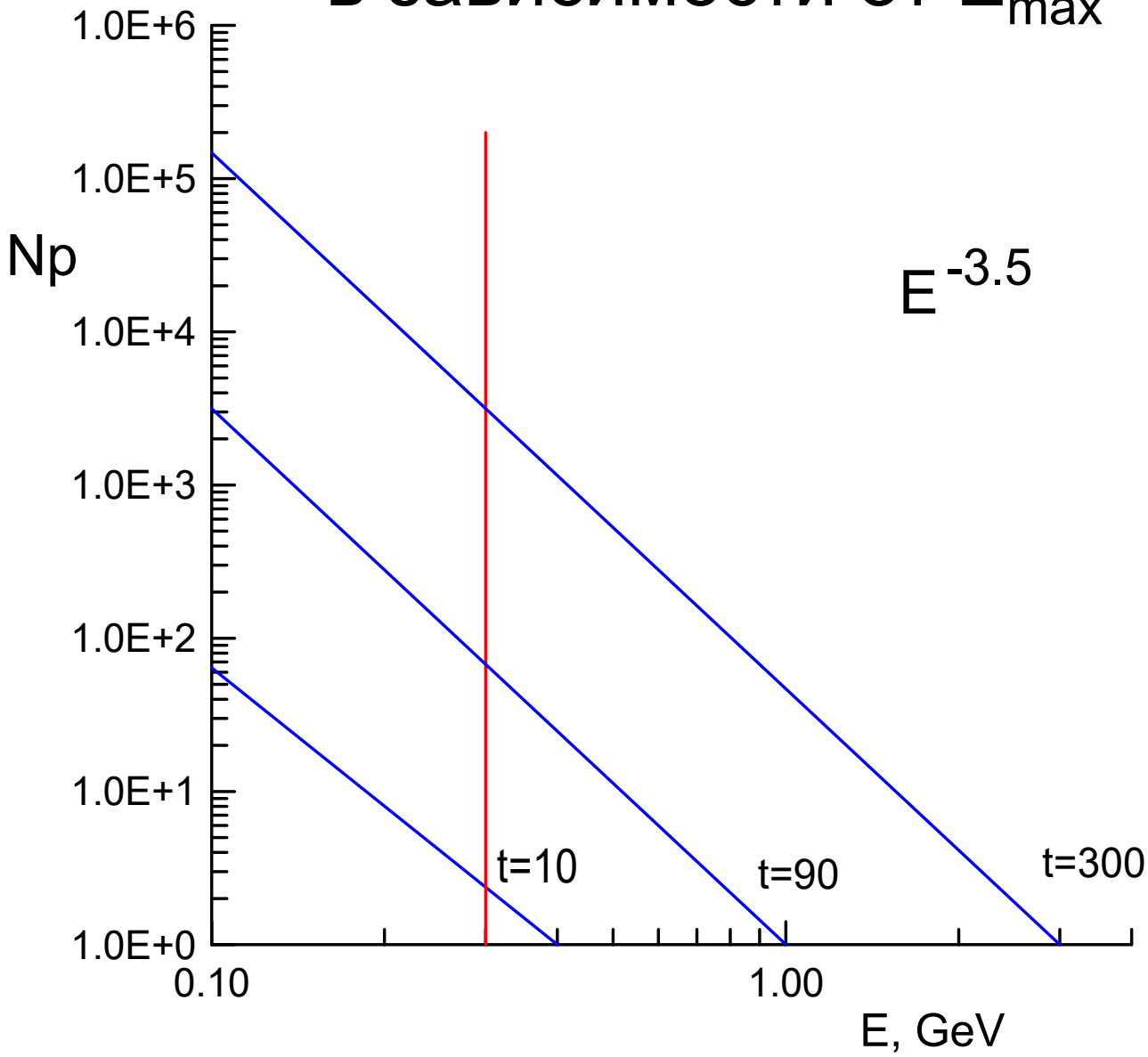
$\Delta R/\Delta t$ = 10 МВ/с $\mathcal{E}$ = $3.3 \cdot 10^{-4}$ В/см

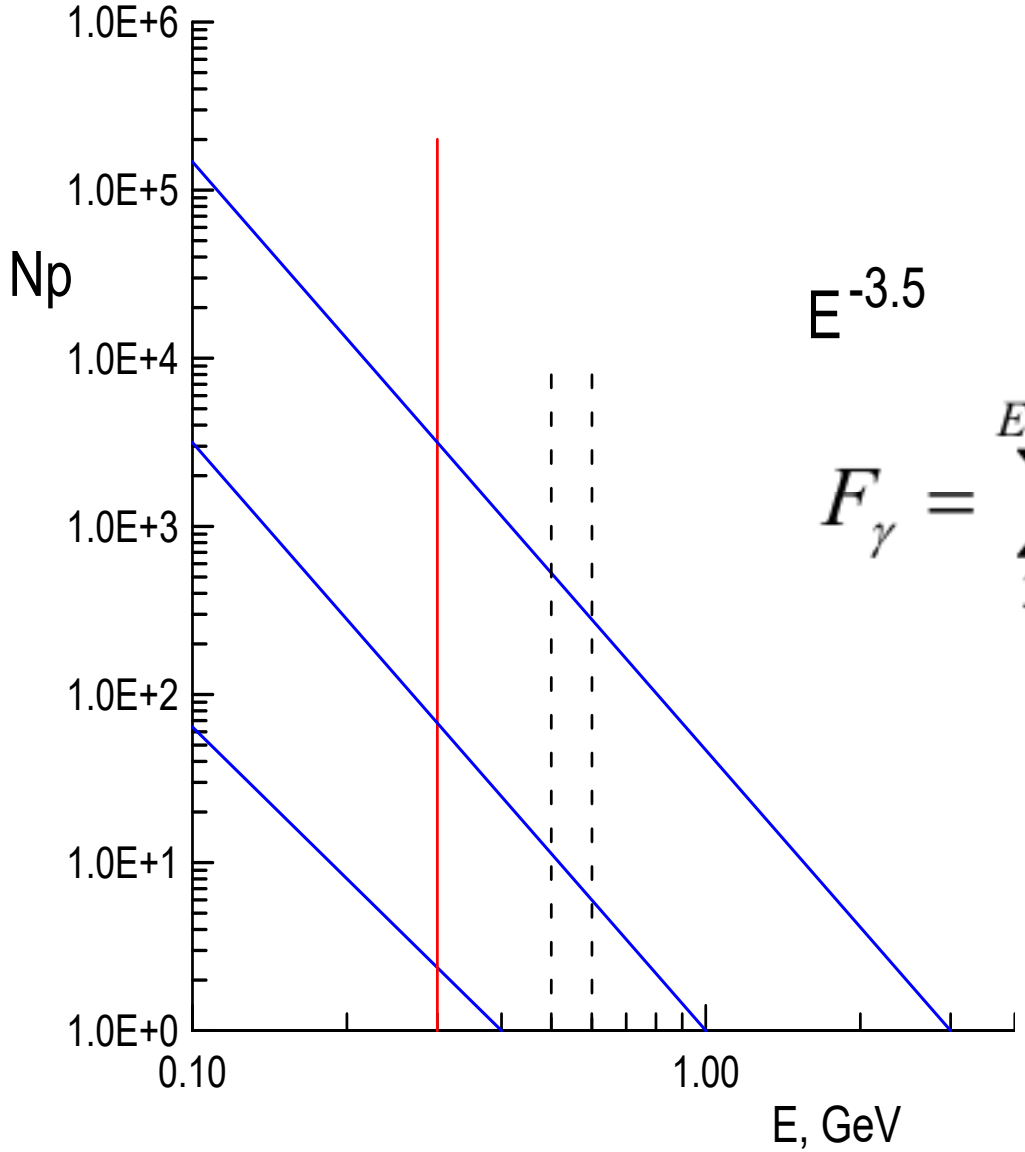
Генерация π-мезонов и гамма-квантов протонами





Число ускоренных протонов в зависимости от E_{max}

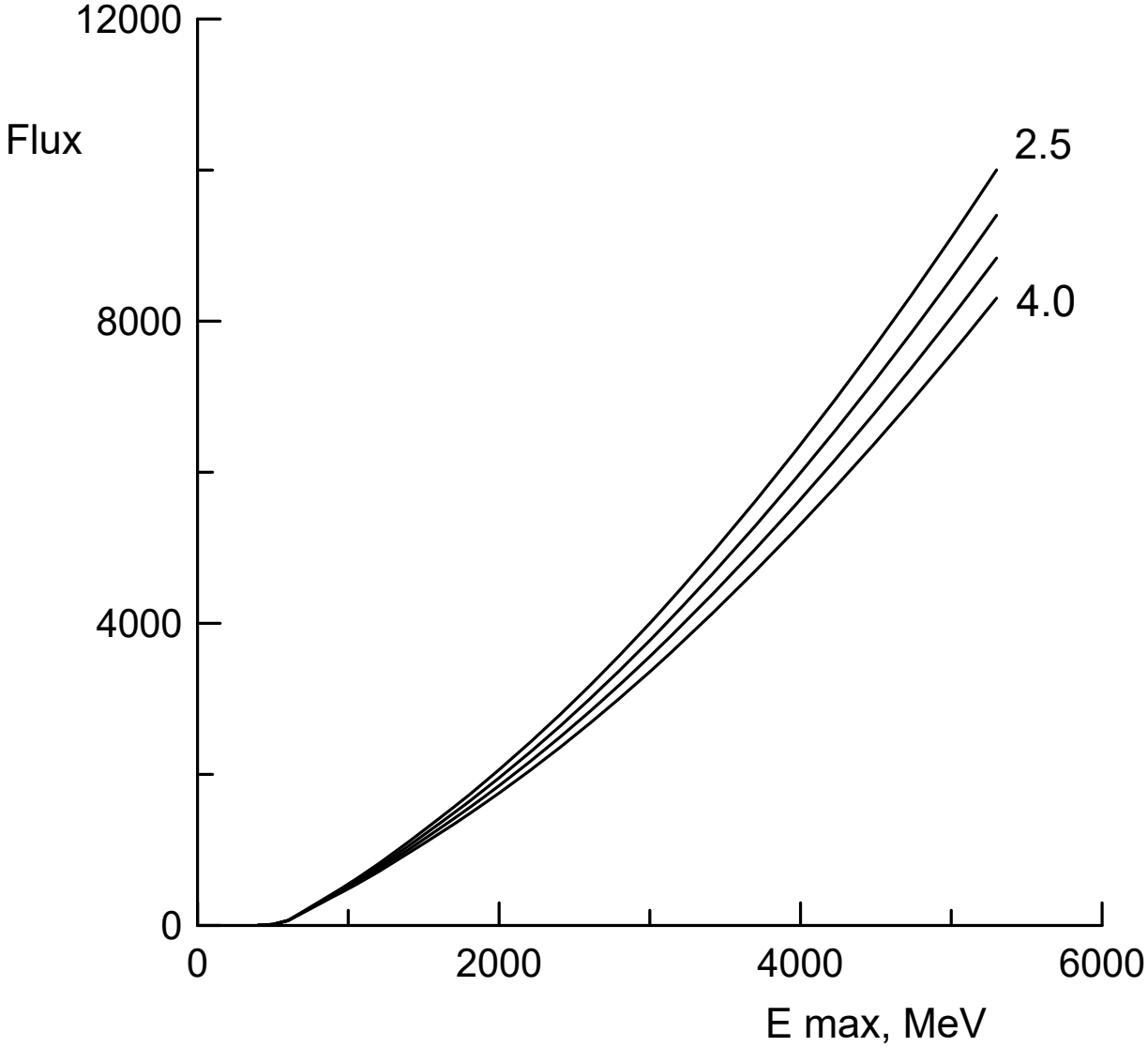




$E^{-3.5}$

$$F_\gamma = \sum_{300}^{E\max} N_p(E_i, E_{\max}) \cdot \sigma_\pi(E_i)$$

Зависимость потока пионных гамма-квантов от E_{max}

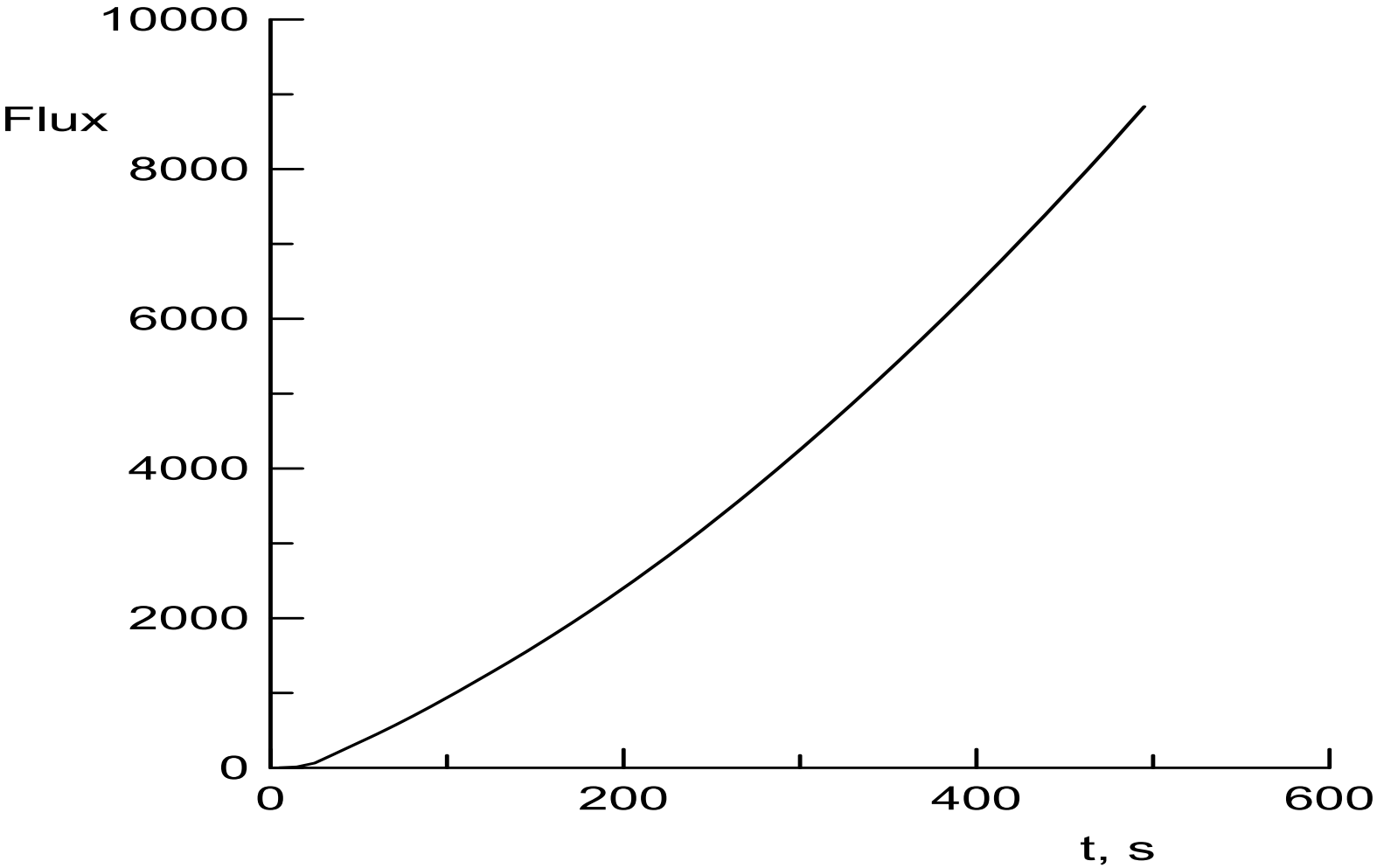


Темп ускорения протонов $\Delta R/\Delta t$=10 МВ/с

E =	300 МэВ	1 ГэВ	3 ГэВ
R =	0.8 ГВ	1.7 ГВ	3.8 ГВ
ΔR	0.9 ГВ	2.1 ГВ	
Δt	90 с	210 с	
ΔR		3 ГВ	
Δt		300 с	

3.8 ГВ – это монитор Ломницкий Штит

Зависимость потока пионных гамма-квантов
от времени при $\Delta R/\Delta t$ = 10 МВ/с

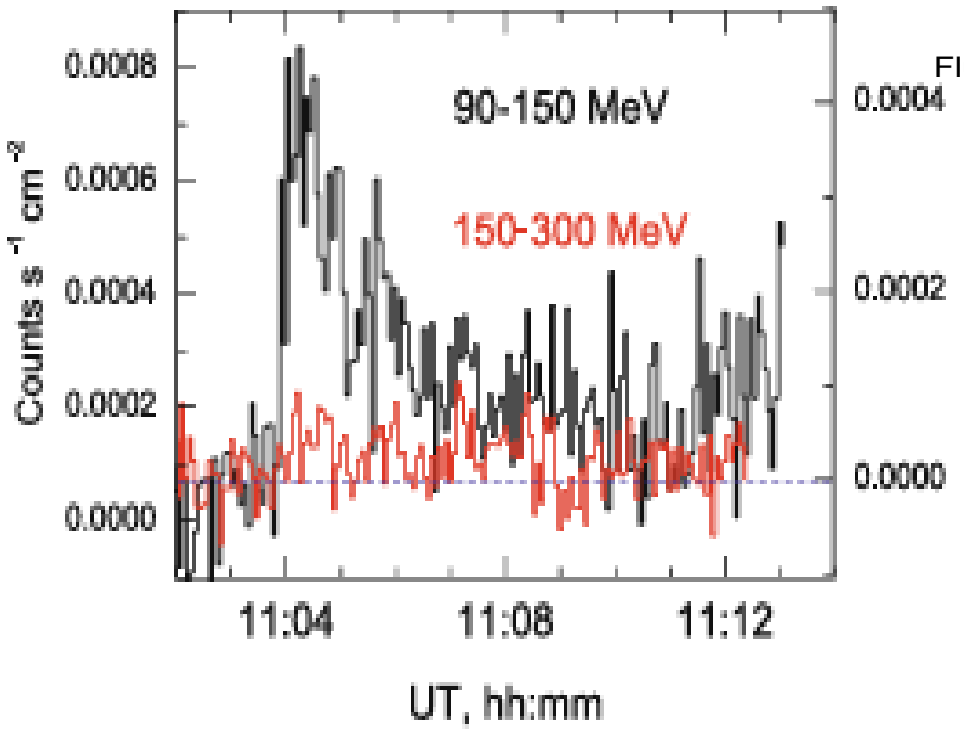


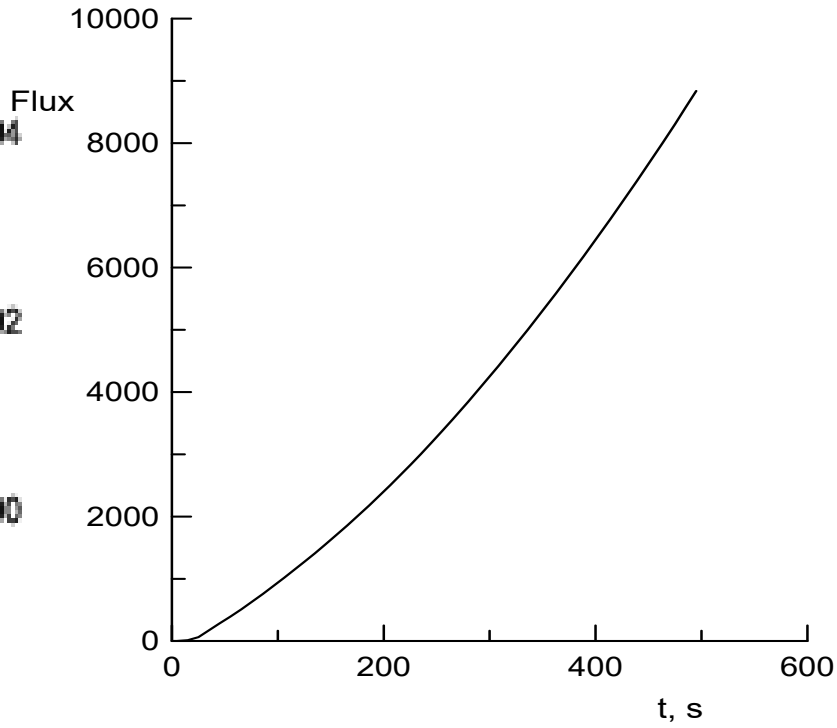
↑ 1 GeV

↑ 3 GeV

1. Скорость нарастания интенсивности пионного гамма-излучения зависит от темпа ускорения протонов до релятивистских энергий.
2. При постепенном ускорении протонов интенсивность пионного гамма-излучения нарастает также постепенно.

28 октября 2003





Модель постепенного ускорения протонов слабым электрическим полем (Струминский и др., 2025) не описывает наблюдаемый профиль интенсивности пионного гамма-излучения в солнечной вспышке 28 октября 2003 г.

28 октября 2003

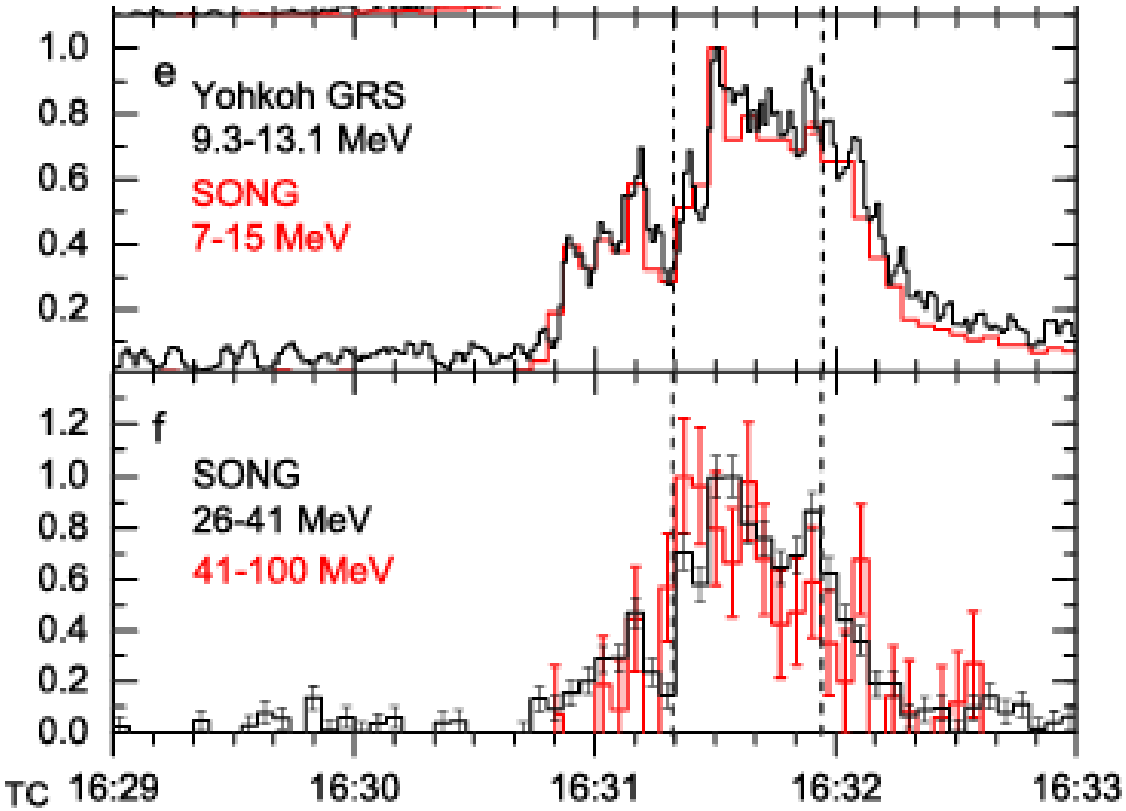
On 28 October 2003 at 11:06 UT the Tsumeb neutron monitor (17.58E, 19.2S, 9.12 GV vertical cutoff rigidity) recorded a 3–4 percent increase.

Onset at the Sun at 10:56:30 ST ±1 minute (‘‘ST’’ is Solar Time, and refers to the Universal Time of an event at the Sun).

СОНГ гамма 11:03:50 UT

Bieber, J. W., Clem, J., Evenson, P., Pyle, R., Ruffolo, D., Saiz, A. Relativistic solar neutrons and protons on 28 October 2003 //: 2005, *Geophys. Res. Lett.,* V. **32**, L03S02, doi:10.1029/2004GL021492

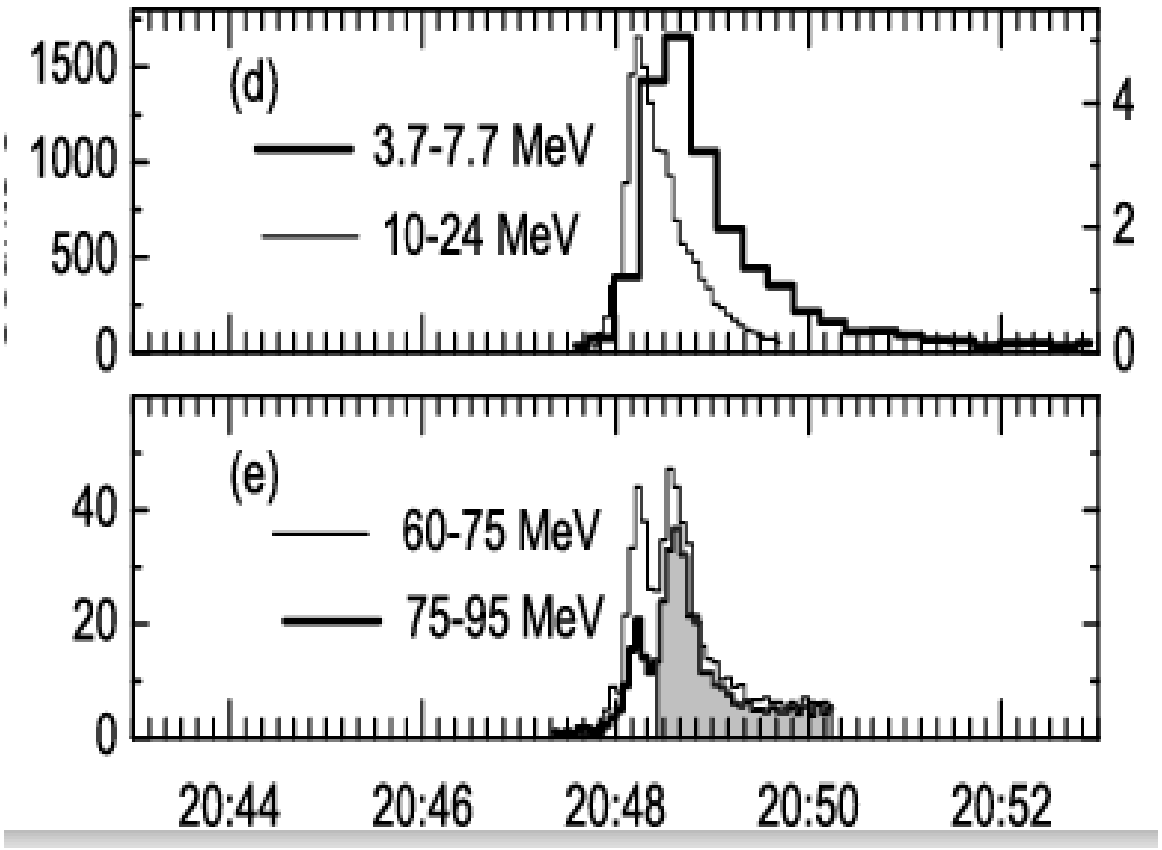
25 августа 2001 г.



X5.3, S21, E38 КОРОНАС-Ф СОНГ

Yushkov, Kurt, Galkin // Solar Physics 2023, 298:31

24 мая 1990

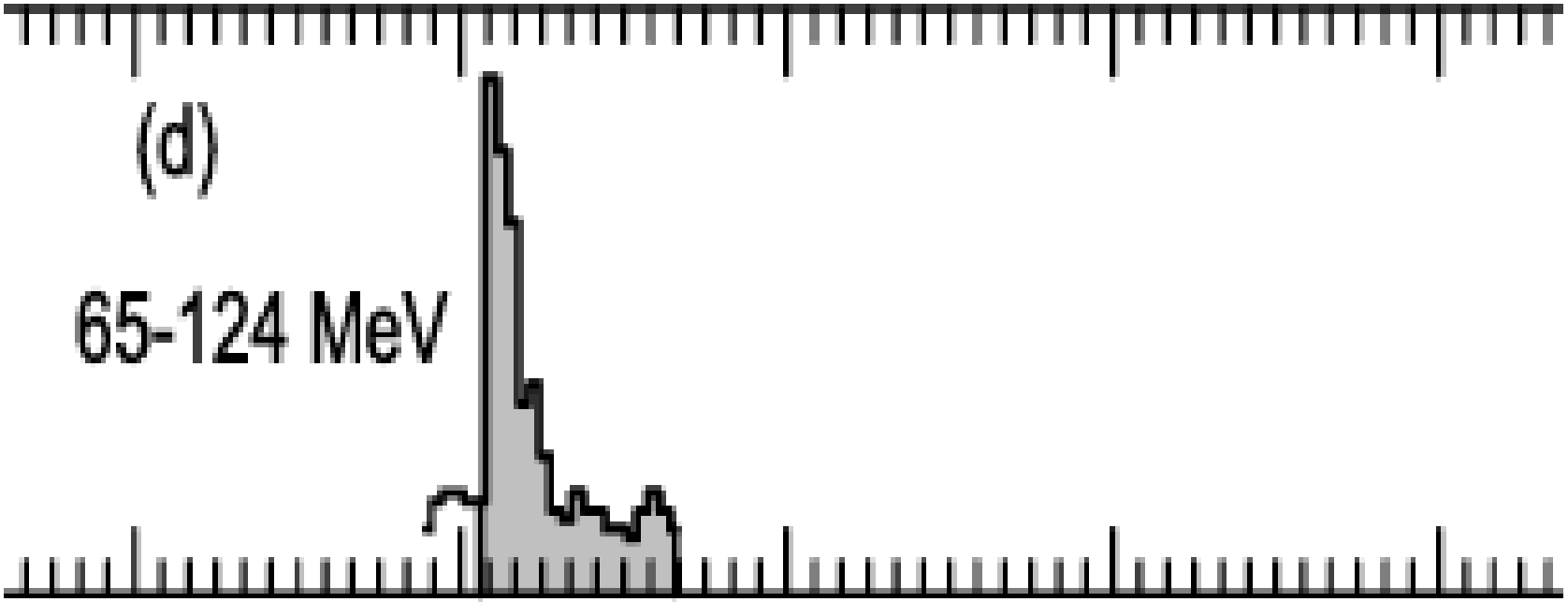


X9.3, N36, W76 GLE48

GRANAT Phebus

Debrunner et al., ApJ 479, 991 (1997)

22 марта 1991



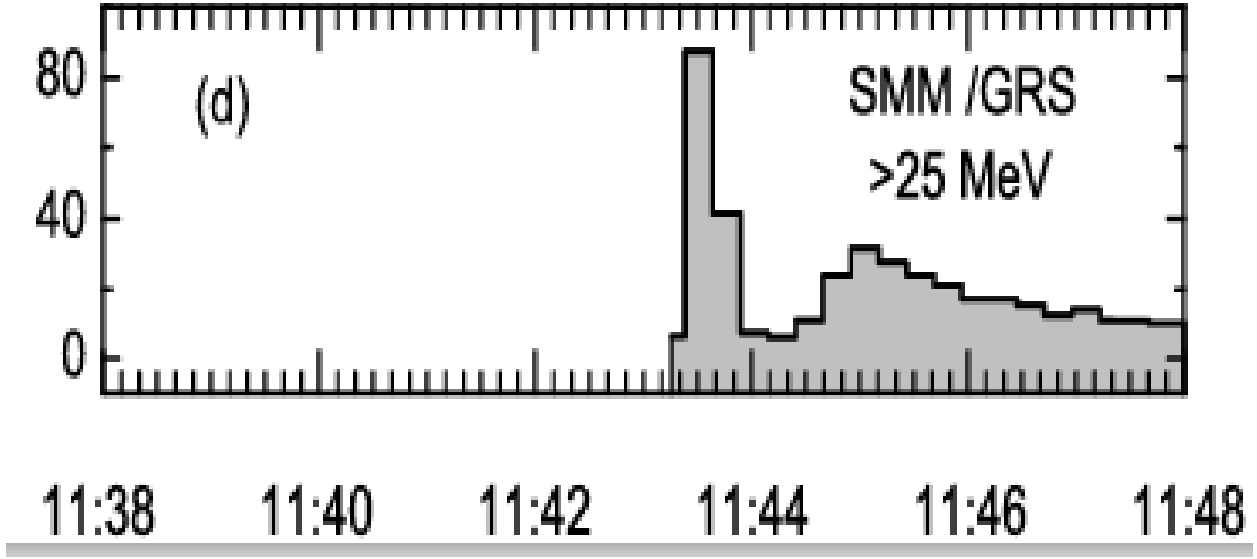
X9.4, S26, E28

GRANAT Phebus

Терехов и др.

Письма в Астрон. ж. 1996 т.22 с.163

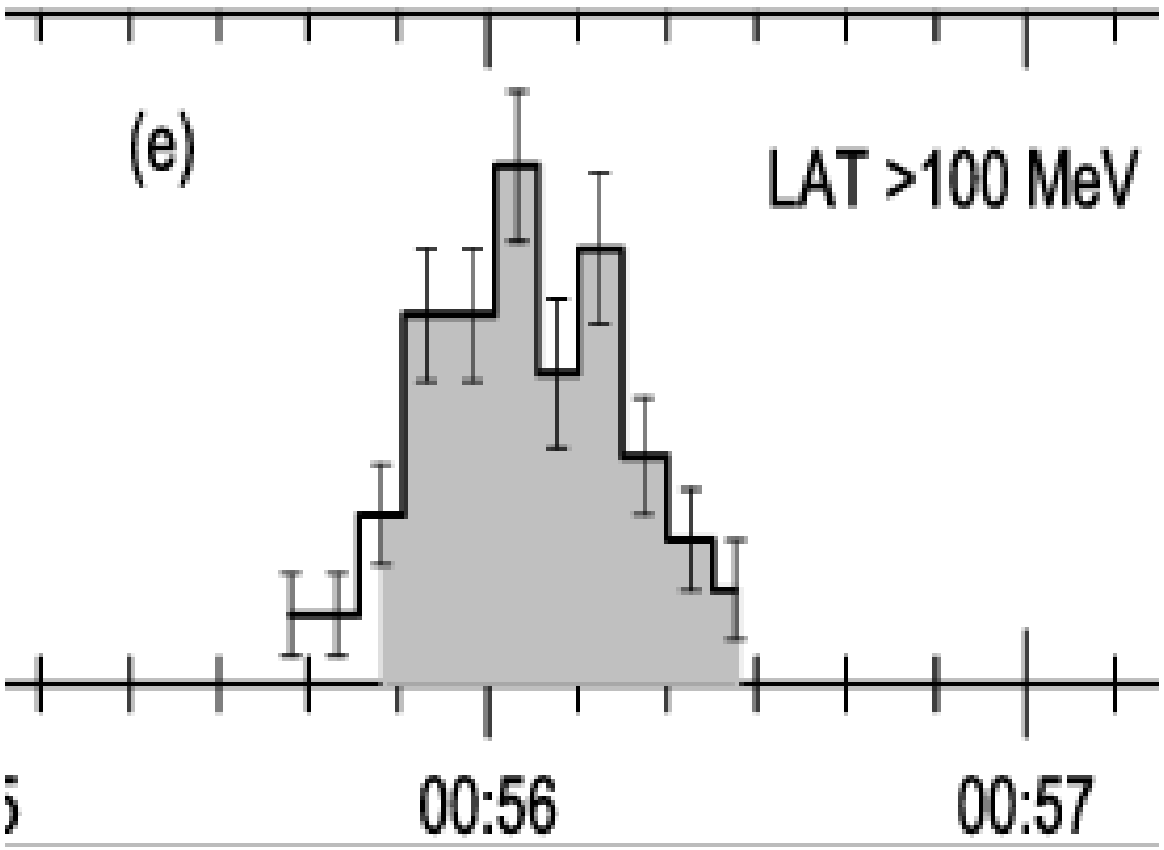
3 июня 1982



X8

Chupp et al., ApJ, 318, 913 (1987)

2010 June 12



Fermi LAT M2

Ackermann et al. ApJ 2012. V.745. P.144

Быстрый (несколько секунд) рост интенсивности пионного гамма-излучения является вполне типичным для мощных солнечных вспышек. Затем наблюдается быстрый спад интенсивности – **ускорение протонов носит импульсный характер**.

Для объяснения наблюдаемых профилей пионного гамма-излучения необходимо увеличить темп ускорения протонов во время главной фазы вспышки до 1 ГэВ/с, т.е. на 2-3 порядка по сравнению с оценками Струминского и др.

ВЫВОДЫ

1. Регистрация высокоэнергичного гамма-излучения позволяет исследовать процессы ускорения протонов до высоких энергий непосредственно на Солнце.

2. Скорость нарастания интенсивности пионного гамма-излучения зависит от темпа ускорения протонов до релятивистских энергий. При постепенном ускорении протонов интенсивность пионного гамма-излучения нарастает также постепенно.

3. Быстрый (несколько секунд) рост интенсивности пионного гамма-излучения является вполне типичным для мощных солнечных вспышек. Затем наблюдается быстрый спад интенсивности – ускорение протонов носит импульсный характер.

4. Модель постепенного ускорения протонов слабым электрическим полем (Струминский и др., 2025) не описывает наблюдаемый профиль интенсивности пионного гамма-излучения в солнечной вспышке 28 октября 2003 г.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ