

# О положении источника $\gamma$ -излучения, регистрируемого телескопом Fermi/LAT в солнечной вспышке

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

Институт солнечно-земной физики, Иркутск, Россия



XVI Конференция молодых ученых  
«Взаимодействие полей и излучения с веществом»  
Иркутск, 16-21 сентября 2019 г.



# Мотивация

- В залимбовой вспышке 1 сентября 2014 г. наблюдалось  $\gamma$ -излучение пионного распада  $> 100$  МэВ, возникающее при взаимодействии протонов  $> 300$  МэВ с веществом:

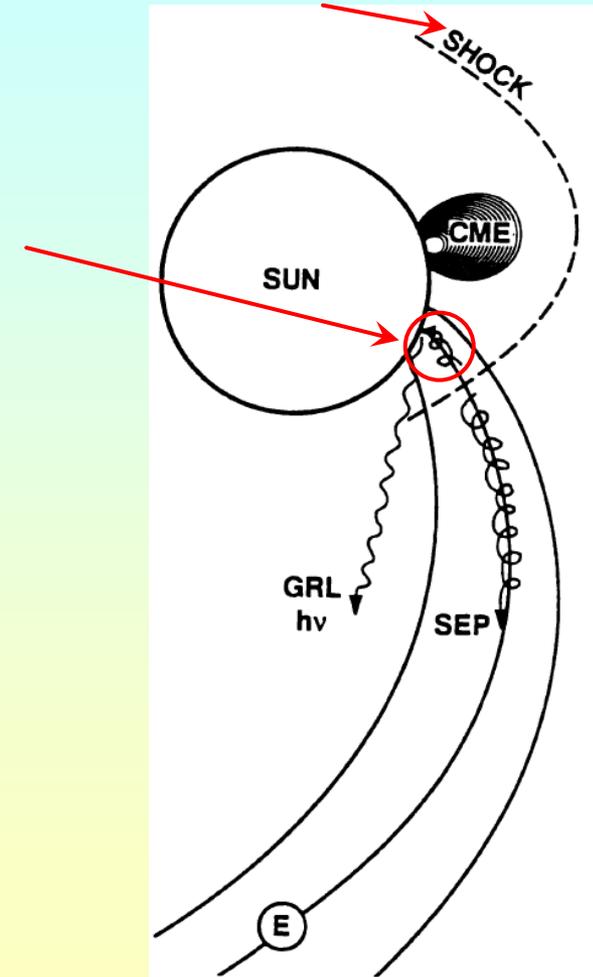


- Что могло ускорить протоны до высоких энергий, и как они могли попасть на видимую с Земли поверхность Солнца?
  - Cliver et al. (1993): часть протонов ускоренных на открытой магнитной структуре головной ударной волной перед сверхальфвеновским КВМ высыпается вдали от места вспышки
  - Plotnikov et al. (2017) и Jin et al. (2018), защищая этот сценарий возбуждения ударной волны, представили некоторые характеристики волны в событии
- Hudson (2017): большое пробочное отношение препятствует высыпанию частиц с больших корональных высот

# Источник протонов

- Гамма-излучение рассматривается сторонниками ускорения протонов ударной волной как подтверждение сценария [Cliver et al., 1993](#)
- Но в рассмотренных нами событиях наблюдалось импульсное возбуждение ударных волн эруптивной структурой [Grechnev et al. \(2013, 2017\)](#)
- Мы анализируем особенности электромагнитного излучения, корональную конфигурацию, область гамма-излучения и его спектр в событии 1 сентября 2014 г.

Головная ударная волна перед сверхальфвеновским КВМ

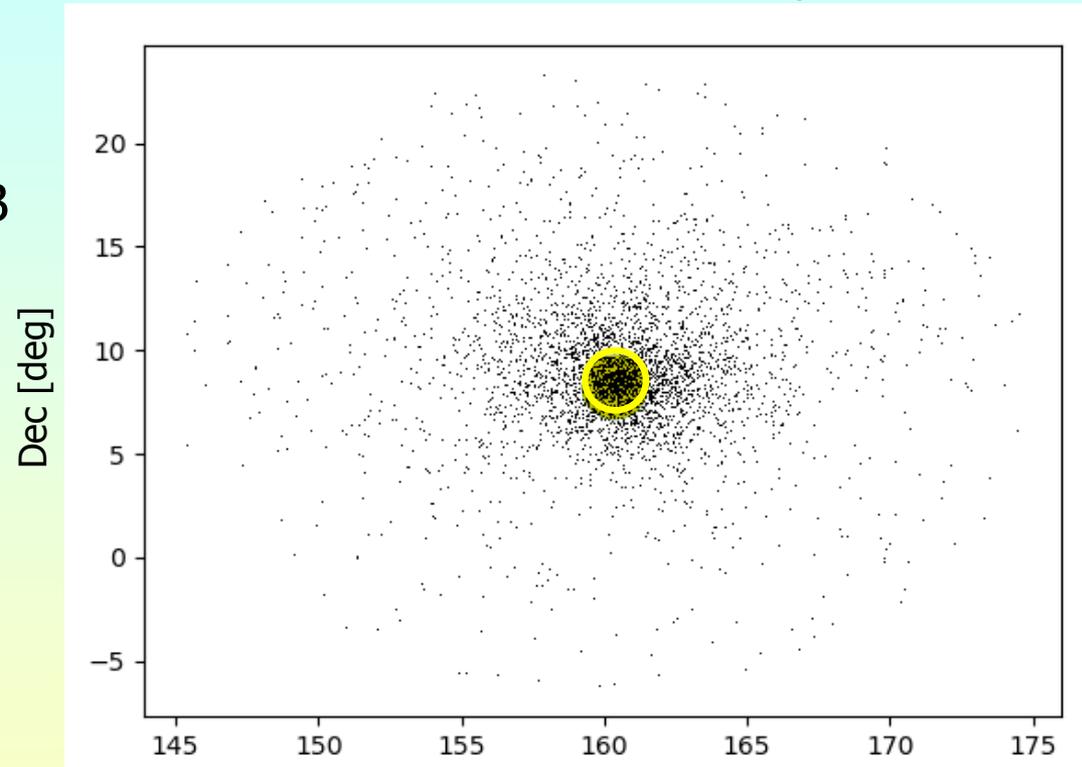


[Cliver et al., 1993](#)

# Fermi/LAT

- Fermi/LAT предоставил возможность пространственно-разрешённых наблюдений  $\gamma$ -излучения выше 100 МэВ
- Положения отдельных  $\gamma$ -квантов занимают обширную область, многократно превышающую площадь солнечного диска
- **Что мы видим для солнечных  $\gamma$ -источников? Вклад от различных источников?**

Geocentric Celestial Reference System

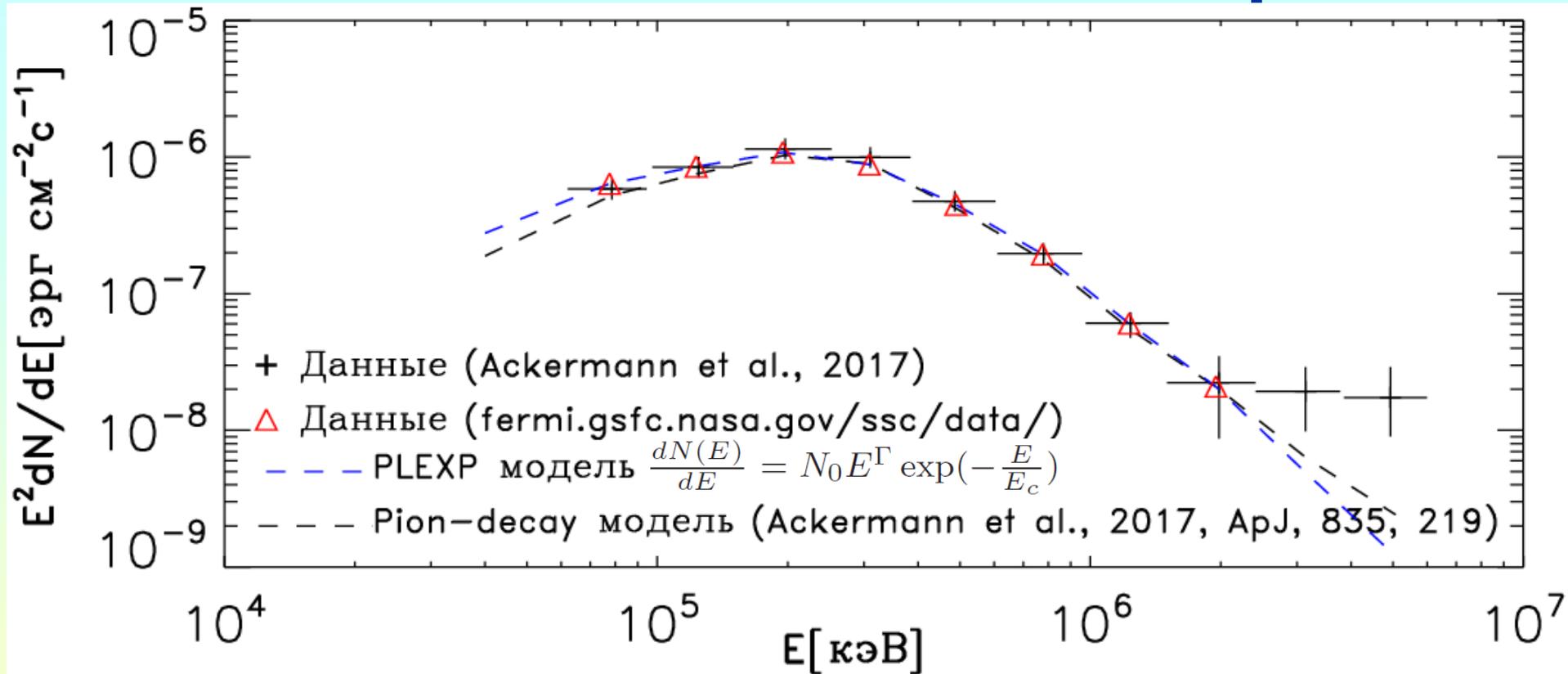


R.A. [deg]  
Положения  $\gamma$ -квантов в событии 1 сентября 2014 г.  
Солнце -«»

# Положение эффективного центра гамма-излучения

- Смещение ЭЦГИ относительно ожидаемого положения источника  $\gamma$ -излучения возможно вследствие наложения нескольких различных источников:
  - $\gamma$ -кванты в солнечной короне при взаимодействии космических лучей;
  - $\gamma$ -кванты при взаимодействии потоков ускоренных частиц и вспышечного излучения с плазмой в корональных стримерах;
  - $\gamma$ -кванты при взаимодействии как космических лучей, так и вспышечного излучения с КВМ [Murphy&Share \(2018, Solar Phys, 293, 163\)](#);
  - $\gamma$ -кванты  $> 100$  МэВ при взаимодействии солнечных энергичных частиц с солнечным ветром [Kahler&Ragot \(2008, ApJ 675, 846\)](#).

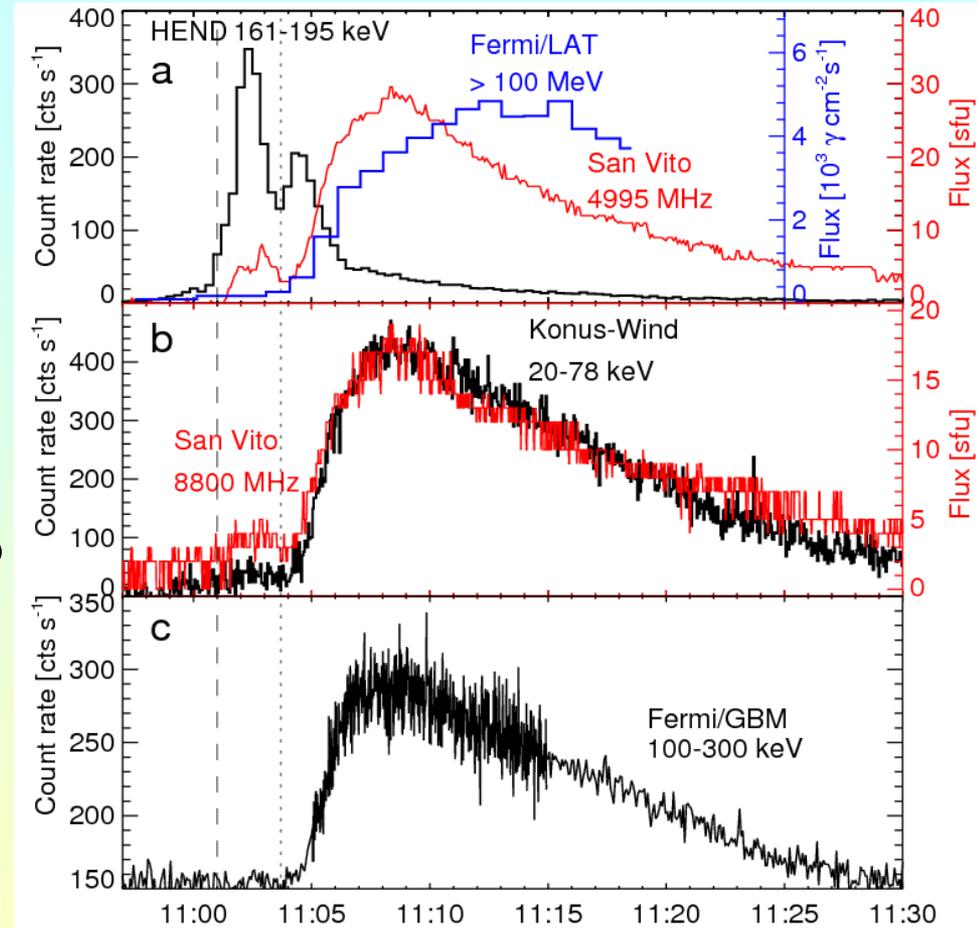
# Fermi/LAT спектр



- Положение эффективного центра  $\gamma$ -излучения  $> 100$  МэВ на восточном лимбе  $\approx$  N41
- PLEXP аппроксимация (<https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/software/>) близка к модели спектра  $\gamma$ -излучения распада нейтральных пионов Ackermann et al. (2017, ApJ, 835, 219)

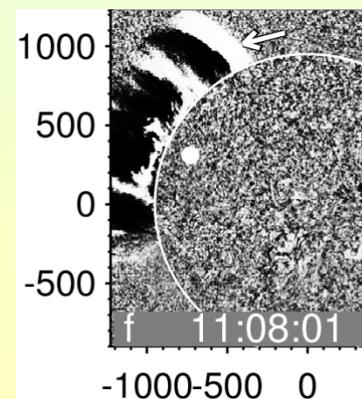
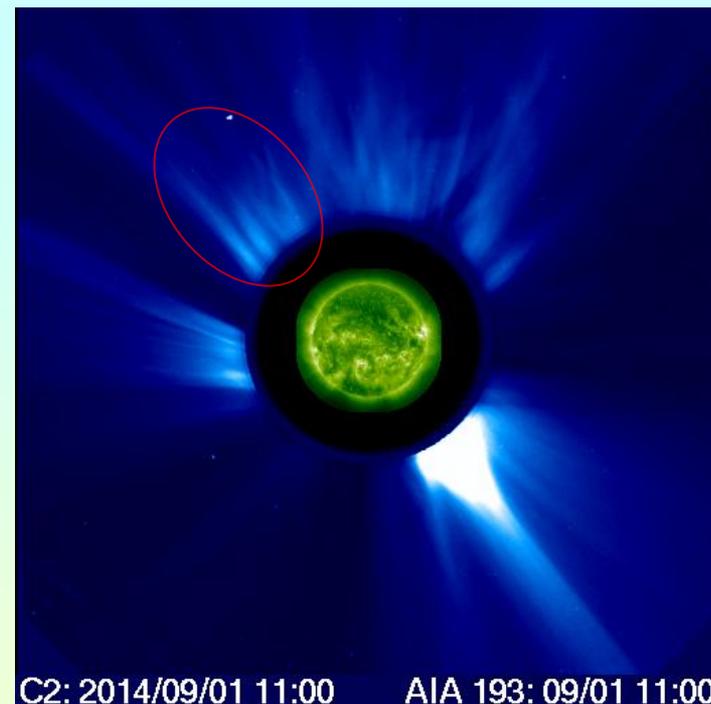
# Электромагнитное излучение

- ЖР с околосолнечной орбиты:
  - HEND 161-195 кэВ
- ЖР со стороны Земли:
  - Konus-Wind 20-78 кэВ
  - Fermi/GBM 100-300 кэВ
- $\gamma$ -излучение:
  - Fermi/LAT  $> 100$  МэВ
- Радиоизлучение:
  - San Vito 5 и 8,8 ГГц

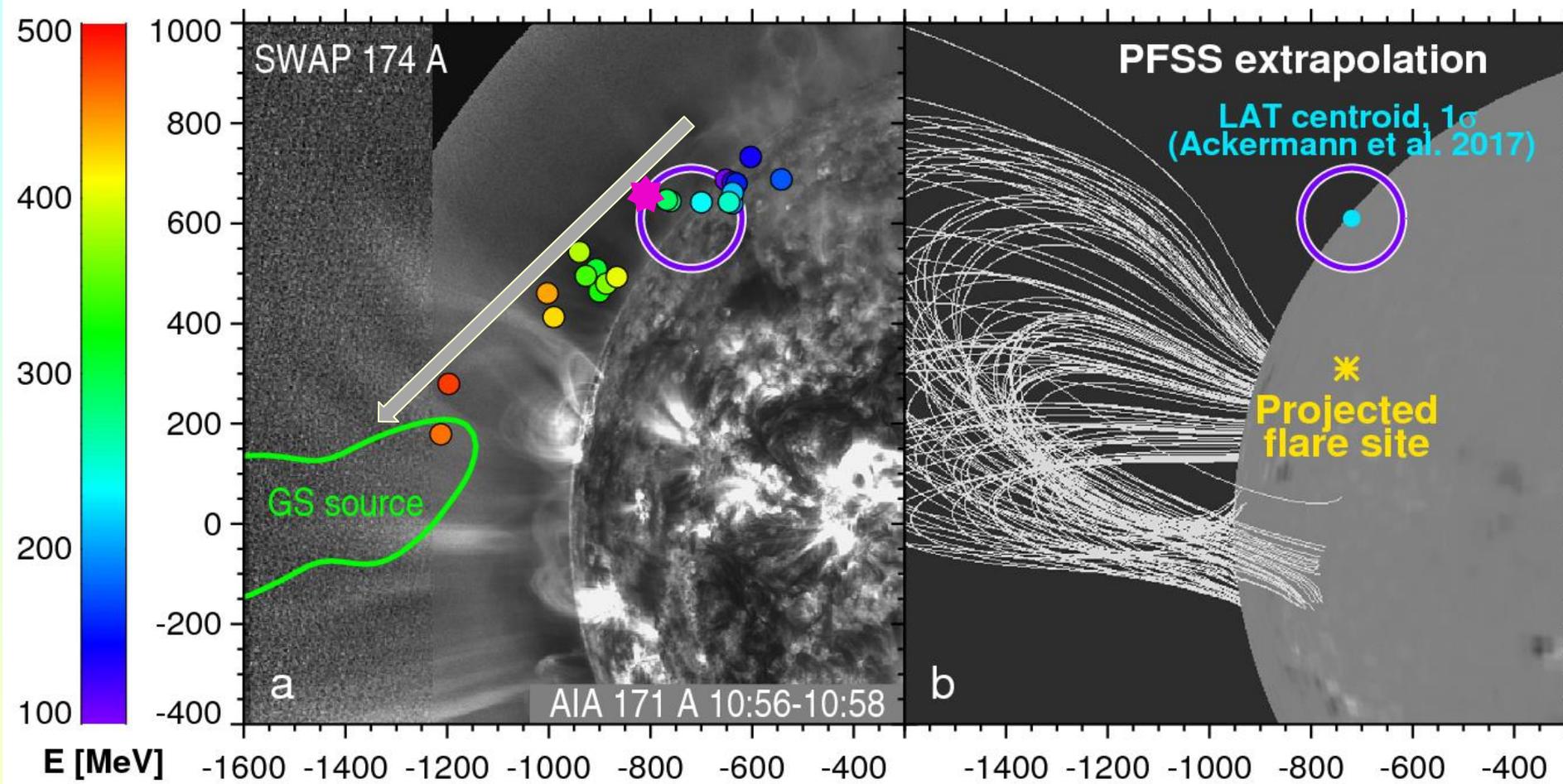


# Области повышенной плотности

- Конфигурация корональных стримеров к началу  $\gamma$ -излучения
- На разностном изображении AIA 211 Å области с повышенной плотностью после прохождения ударной волны



# Смещение центра гамма-излучения



AIA **171** Å; SWAP **174** Å; PFSS модель. Контур – **ГС2**. Область вспышки – «\*». Положение ЭЦГИ Fermi/LAT  $> 100$  МэВ – «⊙» (Ackermann et al., 2017). Смещение ЭЦГИ с повышением нижней пороговой энергии шагами по **50** МэВ показано кругами. Пороговая энергия закодирована цветом круга. Положение полученное с помощью процедуры fermitools gtfndsrc - «\*»

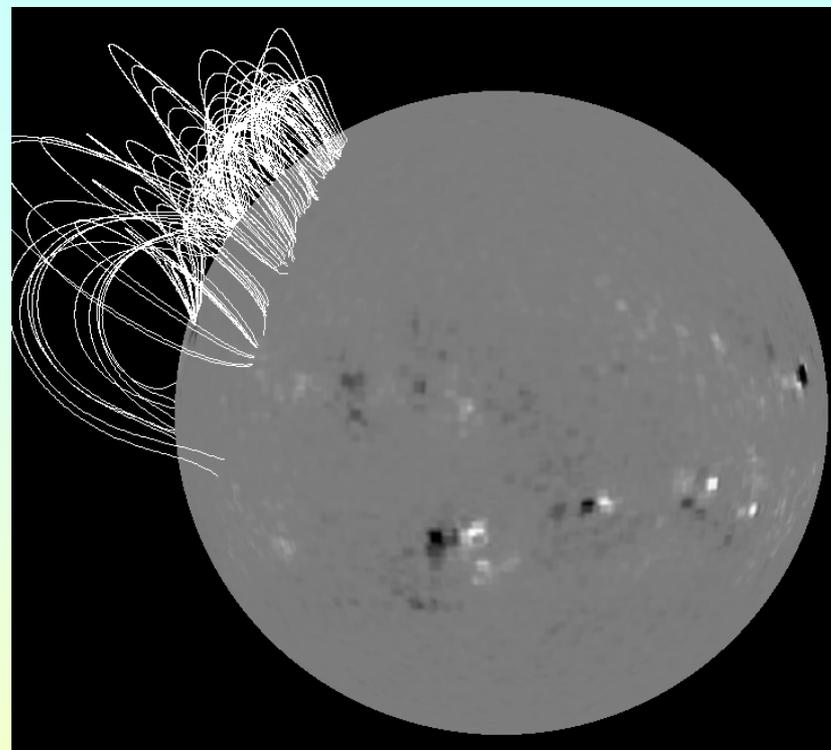
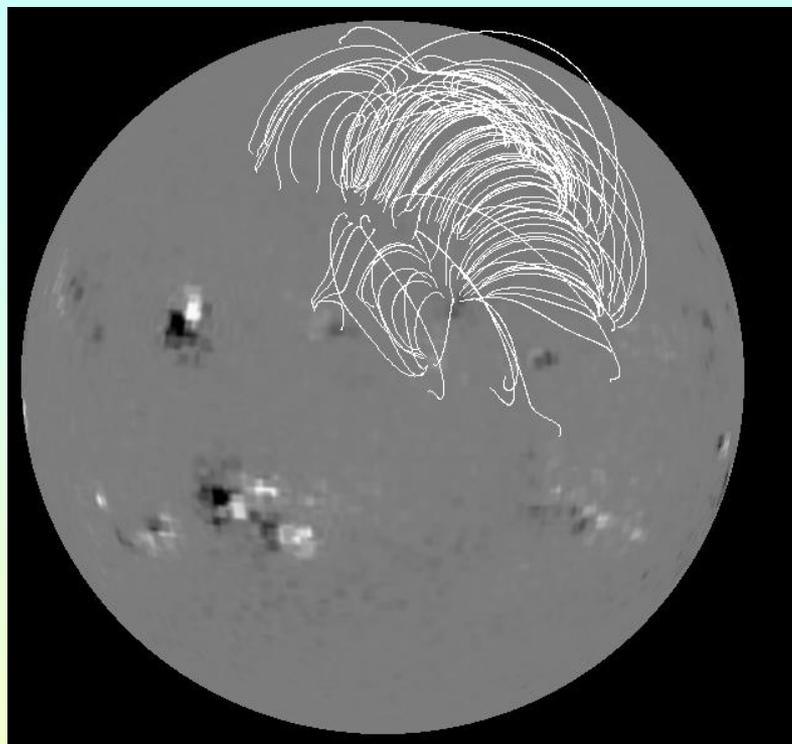
# Заключение

- Наблюдения и вычисления указывают на общность положений источников гиротронного, жесткого рентгеновского и  $\gamma$ -излучения
- Продолжительное гиротронное излучение было близким по форме и длительности жесткому рентгеновскому всплеску, наблюдавшемуся со стороны Земли, и  $\gamma$ -излучению  $> 100$  МэВ
- Длительное электромагнитное излучение могло генерироваться электронами и протонами, захваченными в высоких петлях
- На положение эффективного центра  $\gamma$ -излучения влияют посторонние источники  $\gamma$ -квантов, что подтверждает его зависимость от нижней границы учитываемых энергий
- В событии 1 сентября 2014 г. при повышении пороговой энергии от 100 до 300 МэВ положение  $\gamma$ -источника становится близким к корональным петлям, связанным с местом вспышки
-  Подробнее в работе V. Grechnev, V. Kiselev, L. Kashapova, A. Kochanov, I. Zimovets, A. Uralov, B. Nizamov, I. Grigorieva, D. Golovin, M. Litvak, I. Mitrofanov, A. Sanin (2018, *Sol. Phys.* 293, 133)

# *Спасибо!*

- Организаторам конференции;
- Присутствующим за внимание;
- Л. Кашаповой, И. Зимовцу, Б. Низамову, И. Григорьевой, Д. Головину, М. Литваку, И. Митрофанову, А. Санину за дискуссии и содействие;
- Организаторам конференции;
- РФФ за финансовую поддержку по гранту 18-12-00172;
- Инструментальным командам;

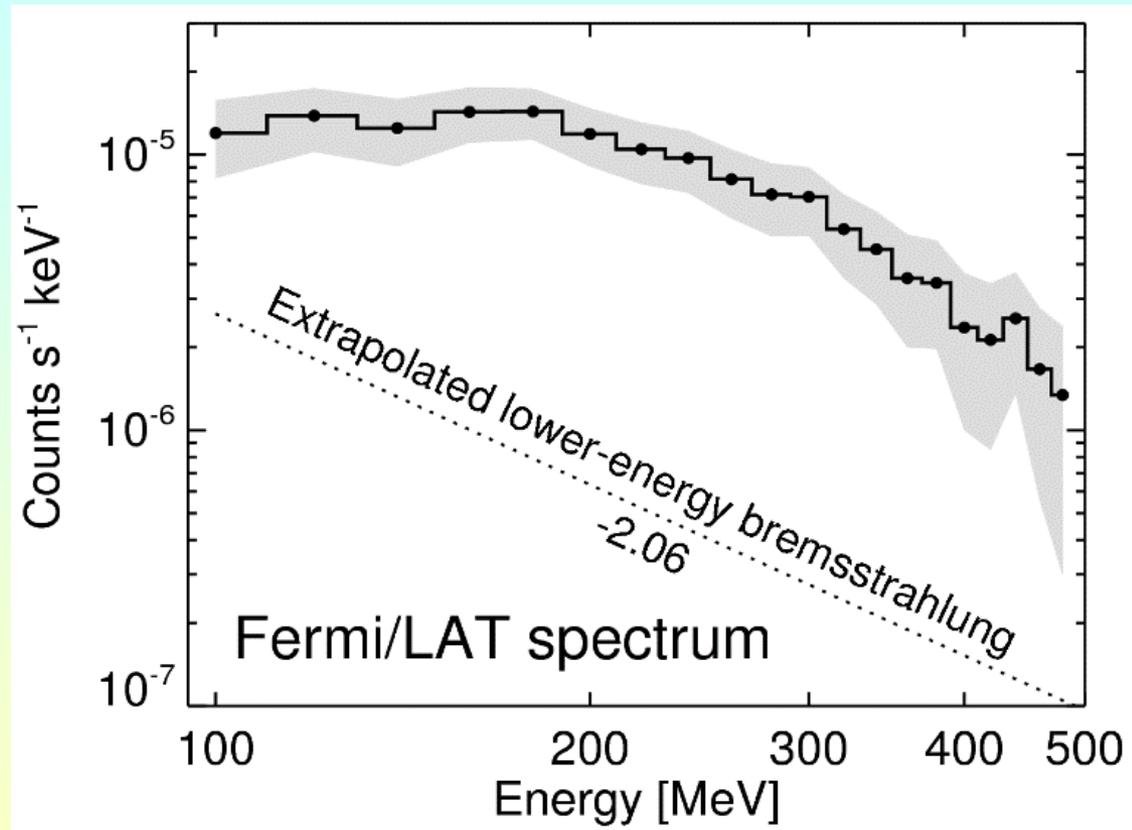
# Магнитные поля в области эффективного центра гамма-излучения



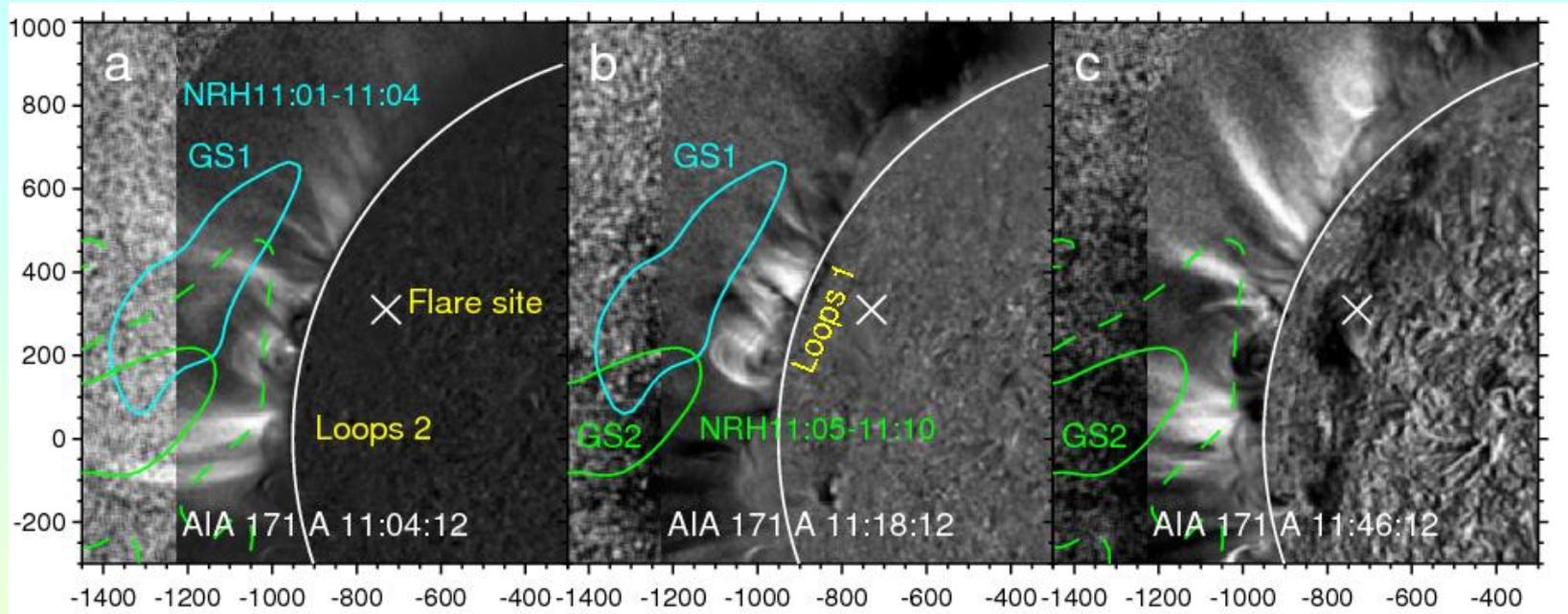
PFSS модель. ЭЦГИ согласно [Ackermann et al., 2017](#) располагался внутри отдельного магнитного домена, полностью покрытого магнитными полями и не связанного с областью вспышки

# Fermi/LAT спектр

- Каждый отсчёт – событие с определённой энергией
- Пунктир экстраполирует тормозное излучения низких энергий (экспоненциальный спад согласно [Ackermann et al., 2017](#))



# Гиротронные источники



- GS1 соответствовал 1 пику в ЖР
- GS2 был расположен в области корональных петель над экватором, где долго удерживались ускоренные частицы, и был ответственен за наблюдавшееся со стороны Земли продолжительное излучение
- Но GS2 был расположен вдали от эффективного центра гамма-излучения  $> 100$  МэВ

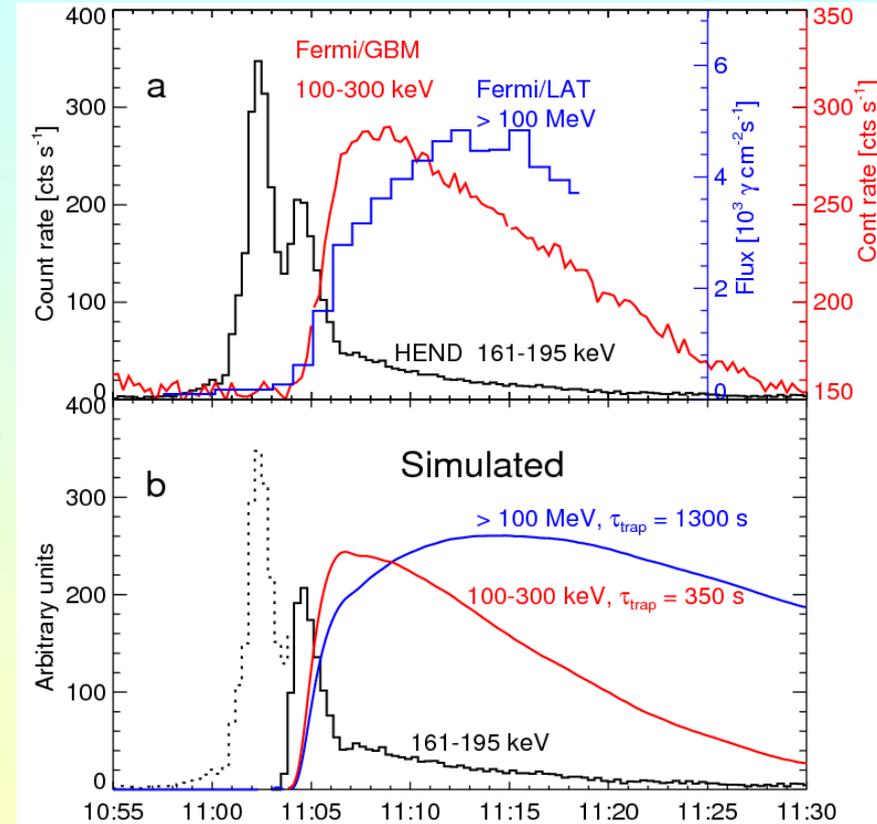
# Различие длительностей

- Различие длительностей 2 пика HEND ЖР вспышки и наблюдавшегося со стороны Земли излучения объяснено захватом и удержанием частиц
- Смоделированное излучение частиц в ловушке близко к реальным профилям

- Инжекция - 2 пик HEND:  $\Psi(\mathbf{t}, \mu, \tau) = \mathbf{t}^\mu \exp(-\mathbf{t}/\tau)$  (Aschwanden, 2004, ApJ, 608, 554)

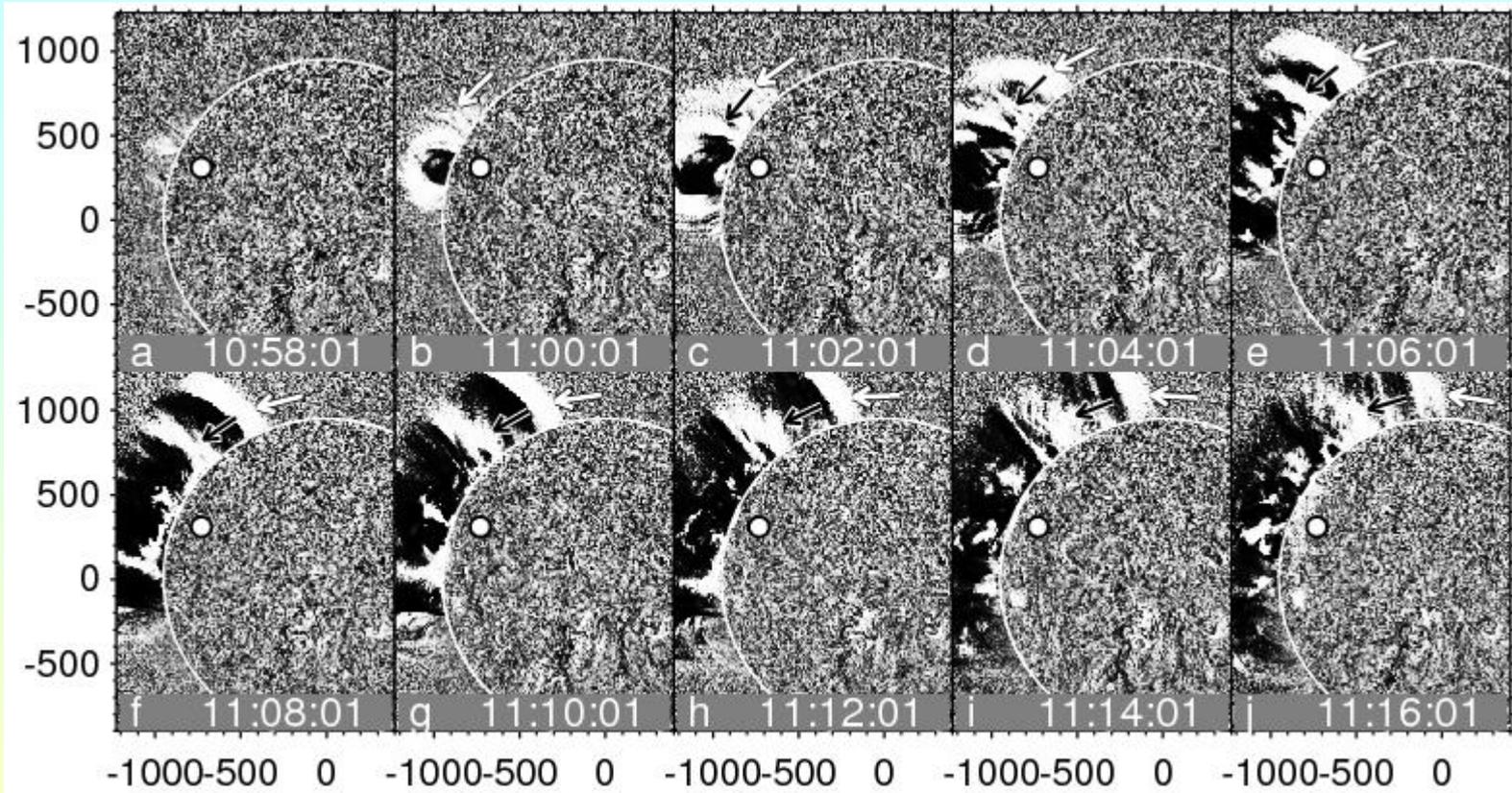
- Излучение частиц в ловушке:

$$I(t) = \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{t-t'}{\tau_{\text{trap}}}\right] f_{\text{inj}}(t') dt'; f_{\text{inj}} = \Psi(\mathbf{t}, \mu, \tau); \text{ Kundu et al. (2001, ApJ, 547, 1090)}$$



**Сравнение наблюдаемого излучения (а) с модельными (б) профилями излучения электронов и протонов в ловушке**

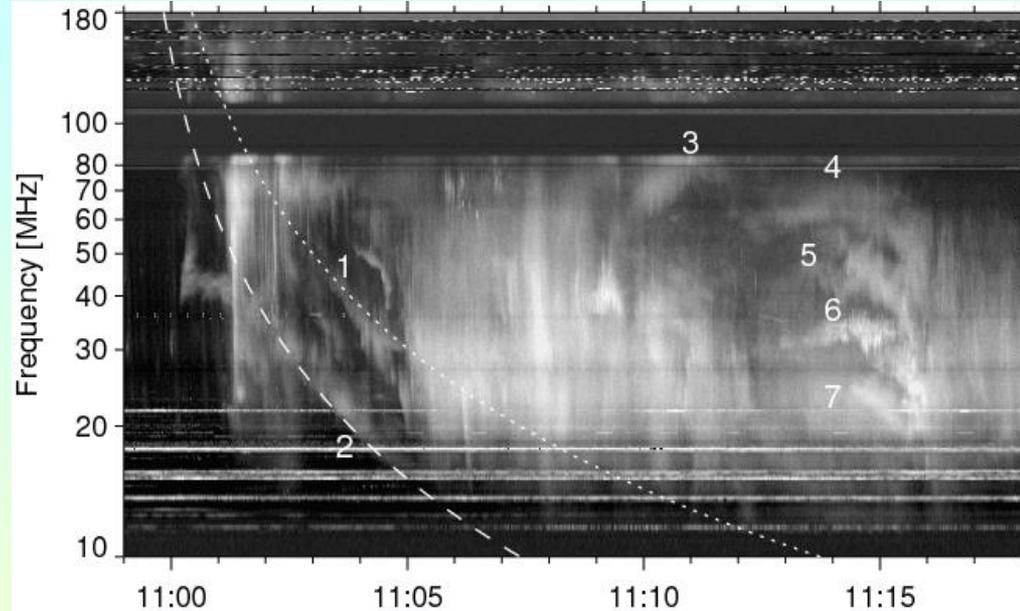
# Две замедляющиеся EUV волны



- AIA 211 Å бегущие разностные изображения
- Волна 1 в 10:59:04 ± 15 с
- Волна 2 ≈ в 11:02

# Динамический спектр

- Модель плотности:  $n(x) = n_0(x/h_0)^{-\mu}$
- Траектория всплеска II типа:  
 $x(t) = x_1[(t - t_{01})/(t - t_1)]^{2/(5 - \mu)}$
- Кривые соответствуют гармоникам всплеска II типа ( $t_{01} = 10:59:04$ ,  $\mu = 2.75$ )
- Источник II типа – стример (Grechnev et al., 2015, 2018)
- Особенности **3–7** с необычным дрейфом соответствуют набору стримеров на изображении EUVI
- Кривые соответствуют измерениям кинематики [Волны1](#)



**Динамический спектр радиовсплеска, составленный по данным Nançay Decametric Array (10-80 MHz), Sagamore Hill (80-128 MHz), San Vito (128-180 MHz)**