

# $e^-$ , $e^+$ низких энергий ( $< 1$ ГэВ) В космических лучах

Аспирант: Мухин П.  
Руководитель: Михайлов В. В.

# План

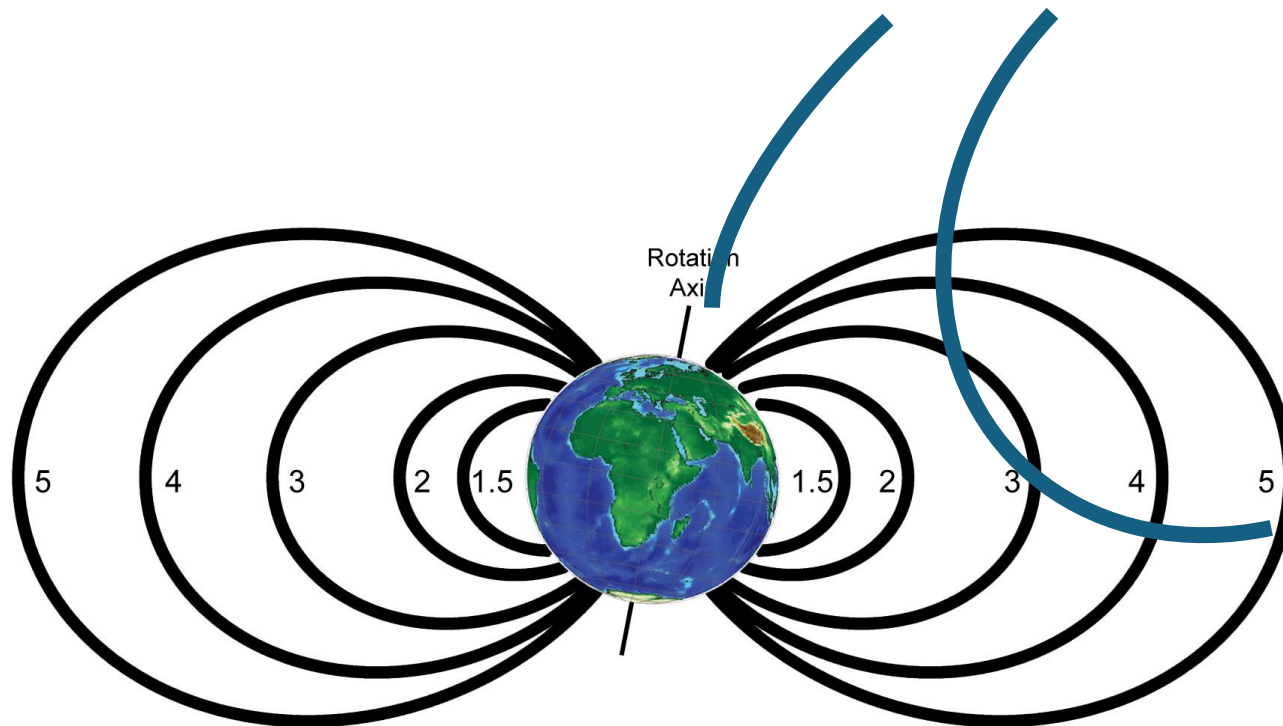
- Регистрация частиц КЛ
  - Энергетические спектры, временные ряды
- Солнечная модуляция и др.

+ Моя работа

# Кратко

- 29 апреля 1897 г. – открытие электрона
- Открытие КЛ → измерения на воздушных шарах, наземные эксперименты →  $(e^+ + e^-)$
- Измерения в космосе → возможность регистрировать низкоэнергетические первичные частицы
- Надо уметь отделять  $e^+/-$  от протонного фона

# Где регистрировать ГКЛ

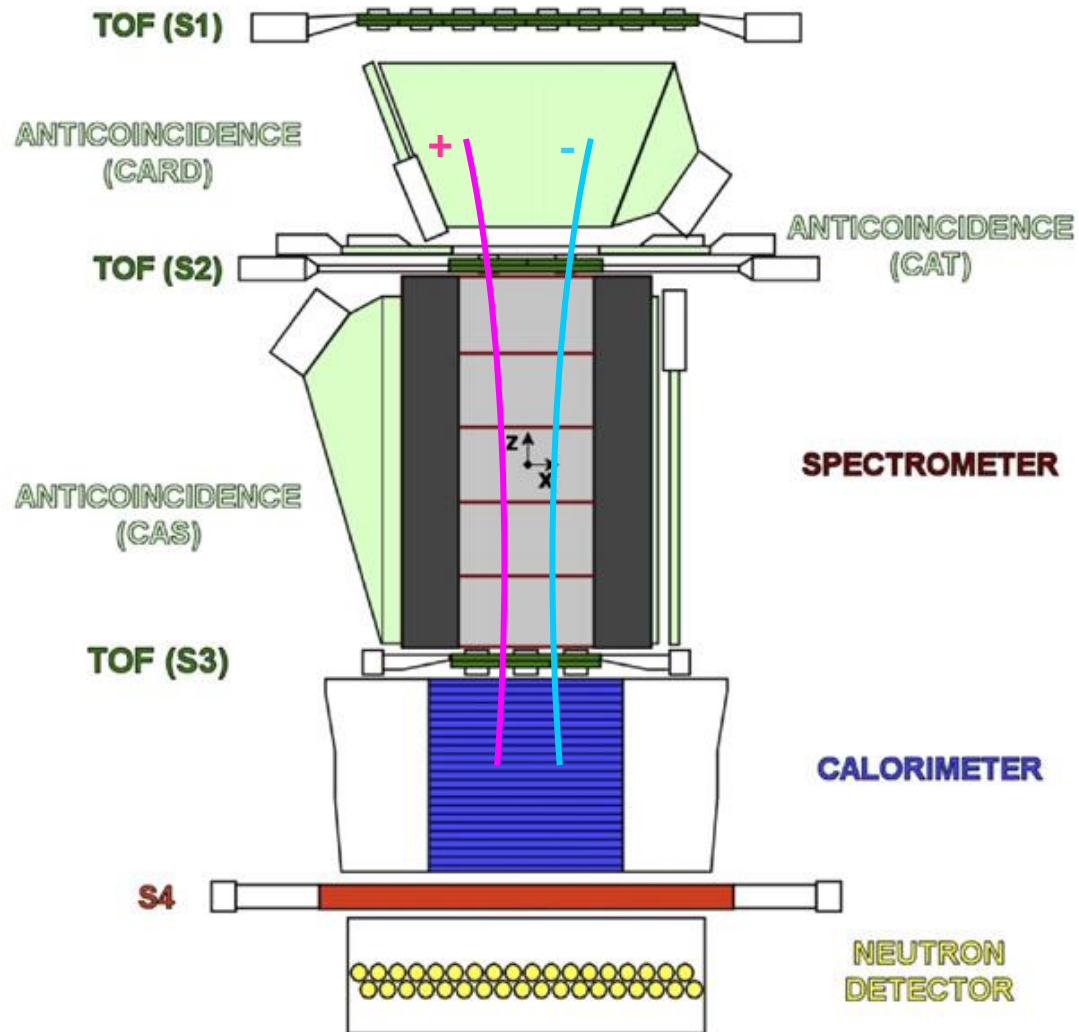


$R = pc / Ze$  -  
жесткость частицы

$L = r / r_E \cos^2 \varphi$   
- L-оболочка

$R > R_{\text{cut}} = 14.9 / L^2$   
- жесткость  
геомагнитного обрезания

# PAMELA



- Регистрирует:

- $e^-$ ,  $e^+$ : **50 МэВ** – сотни ГэА
- $p$ : 80 МэВ – ТэВы
- ядра (He, и т.д.): ...

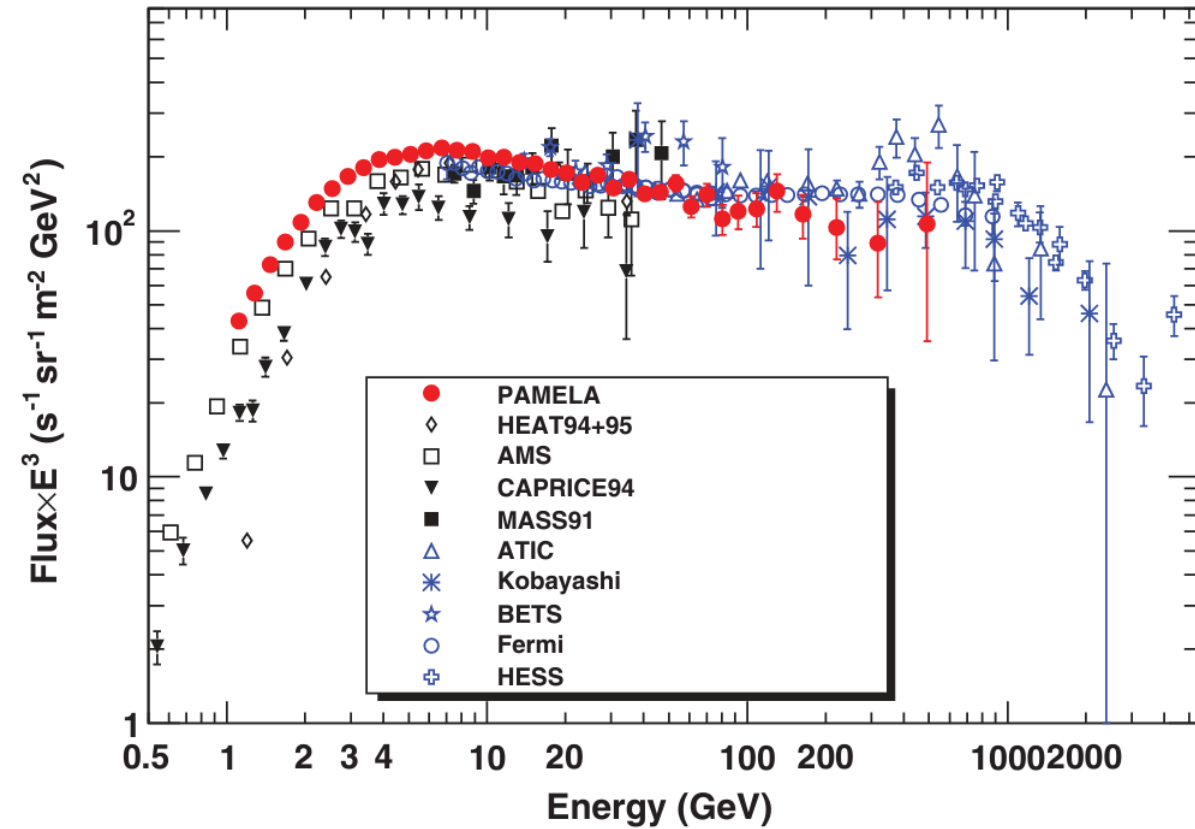
- Орбита спутника:

- 350-600 км
- наклонение  $70^\circ$

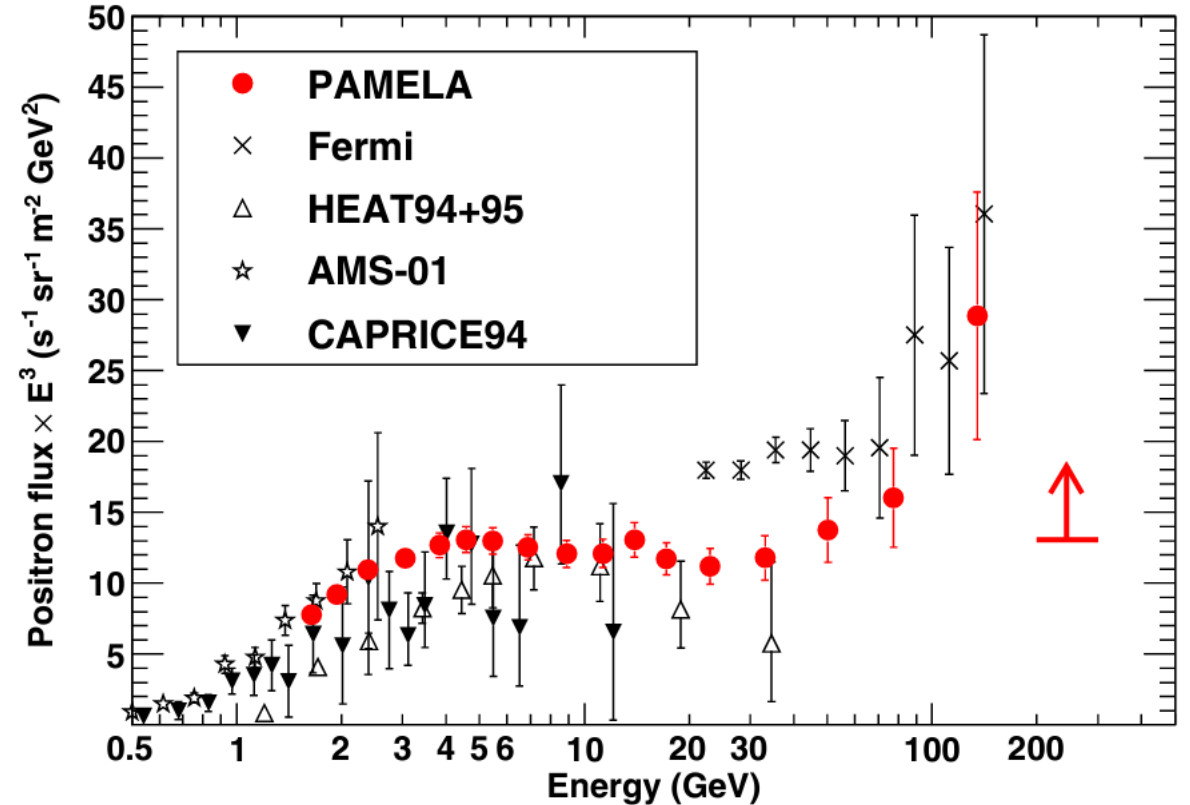
- Период работы: 2006 – 2016  
(Солн. цикл 23 – цикл 24)

Что есть:  
 потоки  $e^-$  (2006-2009),

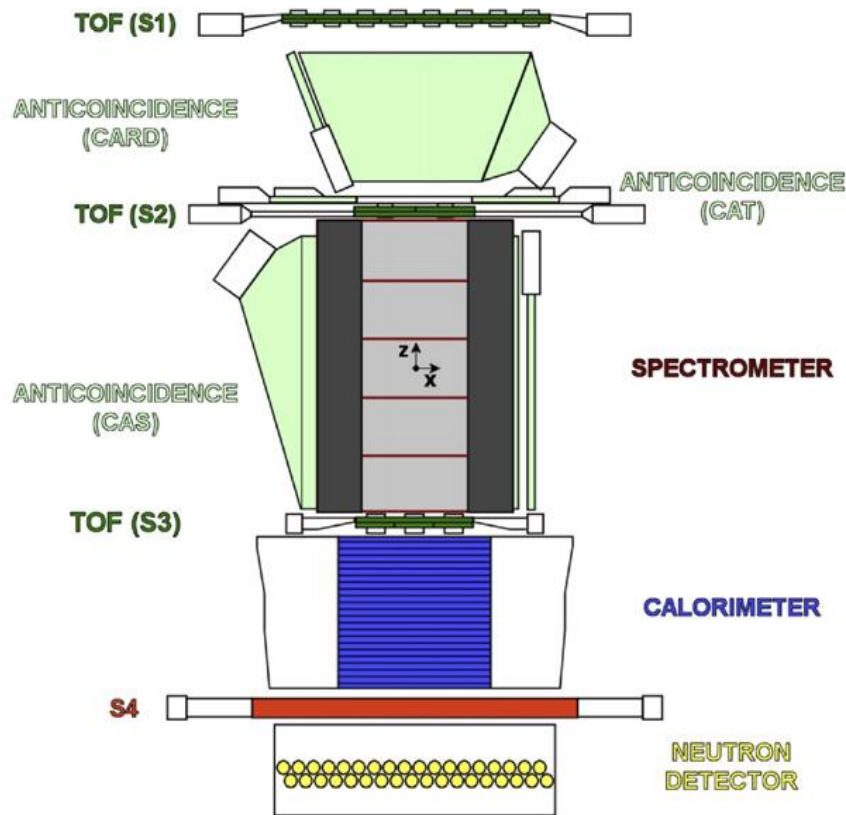
$e^+$  (2006-2009)



Phys. Rev. Lett. 106, 201101 (2011)



Phys. Rev. Lett. 111, 081102 (2013)



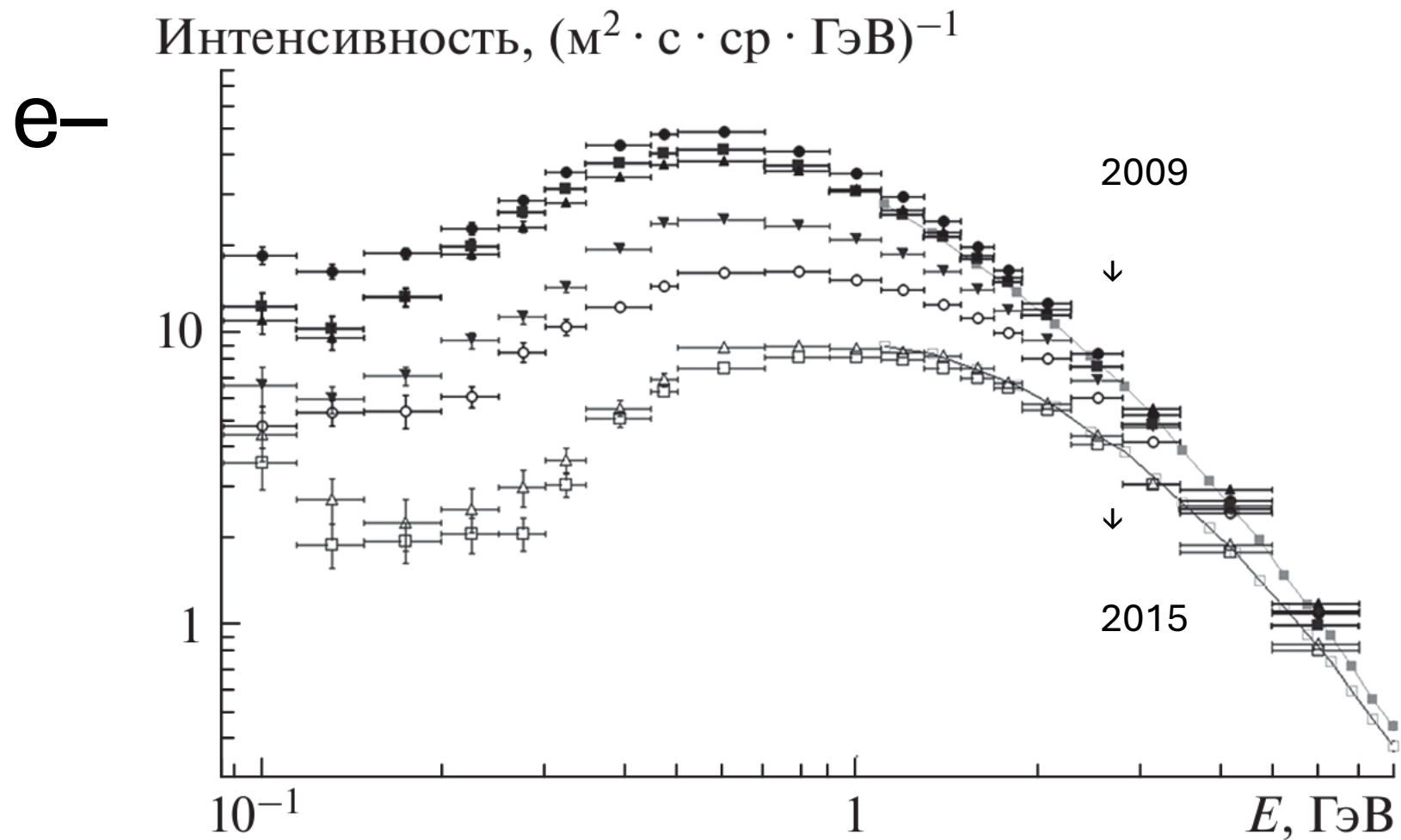
## ОТБОР ПО КАЛОРИМЕТРУ

Суть параметра	Обозн.	Пример критерия
Форма ливня (~ число веток)	$N_{core}$	$N_{core} > a R ^b - c$
Энерговыведение -- полное	$Q_{tot}$	$\begin{cases} Q_{tot} < a_1 R  + b R e^{-c/ R } + d_1 \\ Q_{tot} > a_2 R  + b R e^{-c/ R } + d_2 \end{cases}$
-- вдоль оси ливня	$Q_{track}$	$0.3 < Q_{track}/Q_{tot} < 0.7 + \frac{0.02}{ R }$ $Q_{track} > a R ^{0.9} - b$
-- максимальное в 1 стрипе	$Q_{max}$	$Q_{max}/Q_{track} < a + b/ R ^{0.9}$ $a_1 R  < Q_{max} < a_2 R  + b$
-- в первых 4 плоскостях -- -- в цил. двойного мольер. радиуса (7-8 стрипов)	$N_{pre},$ $Q_{pre}$	$8.5 + \frac{20}{1 - 7 R } < N_{pre} < 7(4 + \lg R )$
-- -- в цил. мольер. радиуса (3-4 стрипа)	$N_{presh},$ $Q_{presh}$	$Q_{presh}/N_{presh} > 1.8, \text{ if }  R  > 0.1$ $Q_{presh}/N_{presh} > 1.8(1 - e^{- R /0.1}), \text{ if }  R  < 0.1$
...	...	...

N – параметр наличия сигнала  
Q – параметр энерговыведения

Критерии и числовые параметры подбираются отдельно

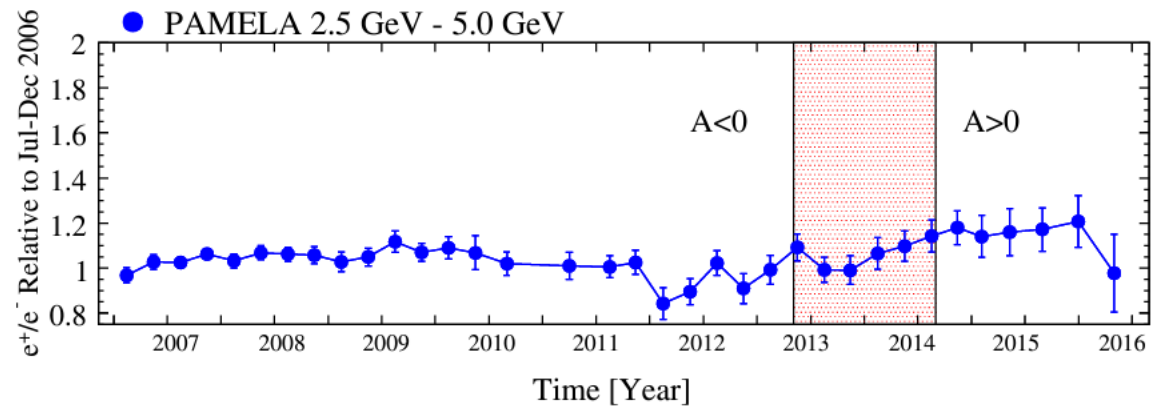
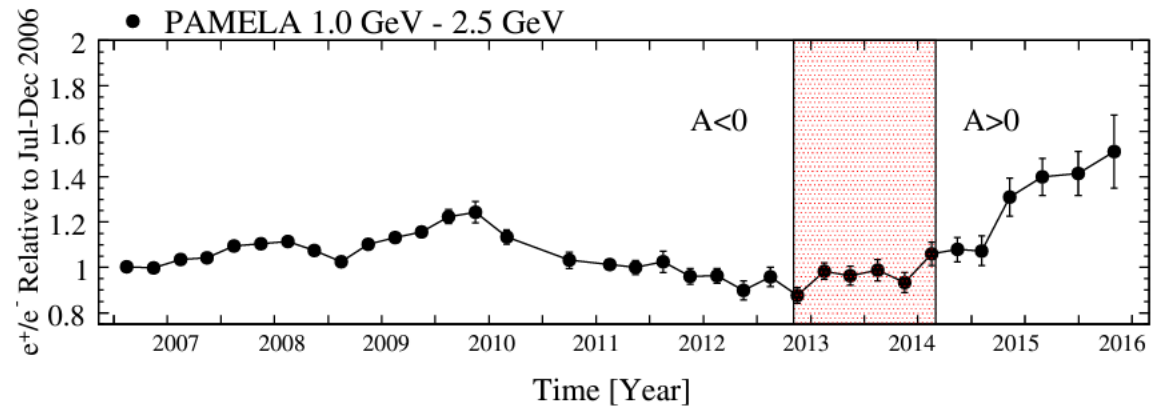
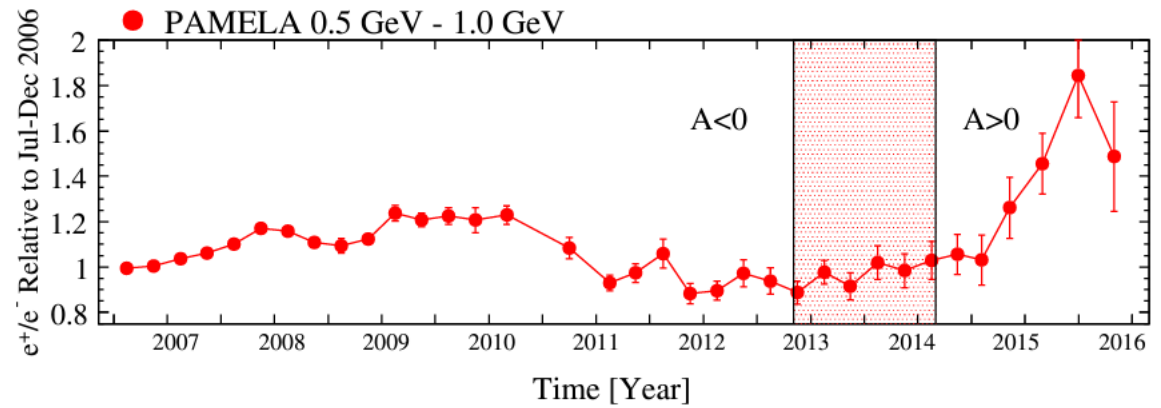
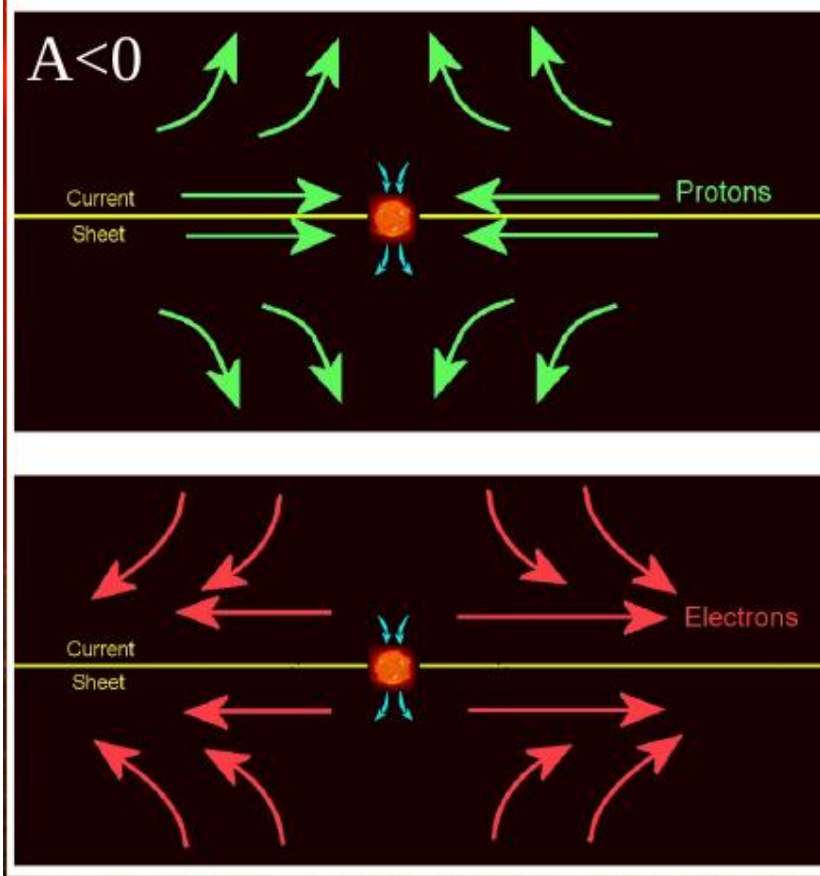
На данный момент выбрано 10 критериев





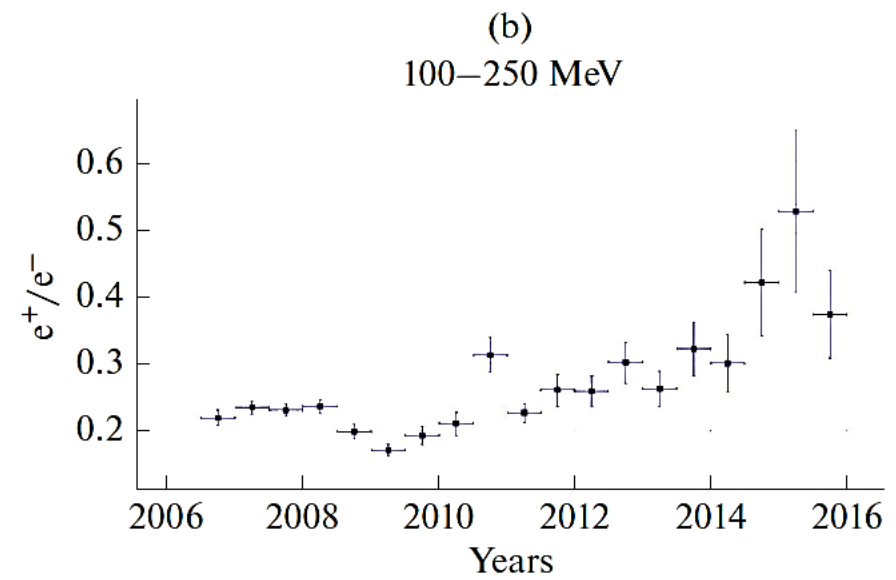
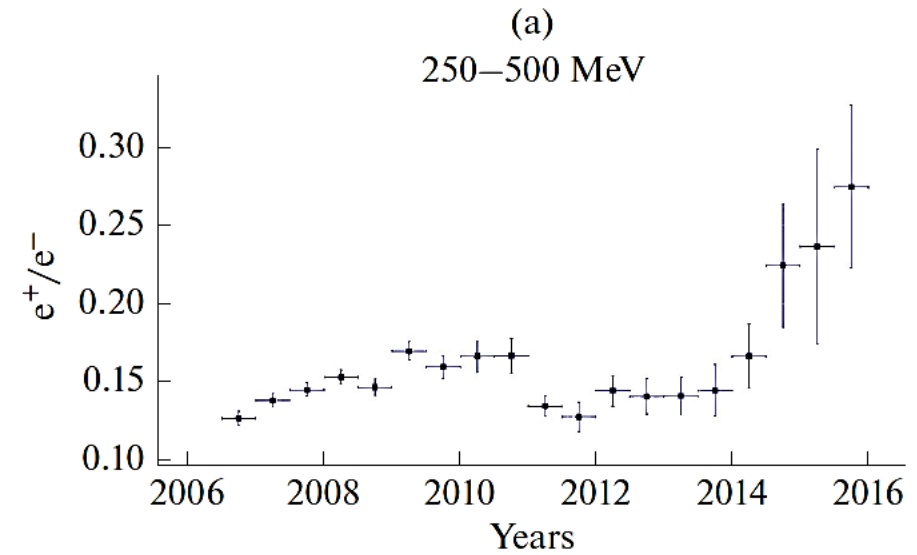
# Что еще есть: Временные ряды

$e^+ / e^-$



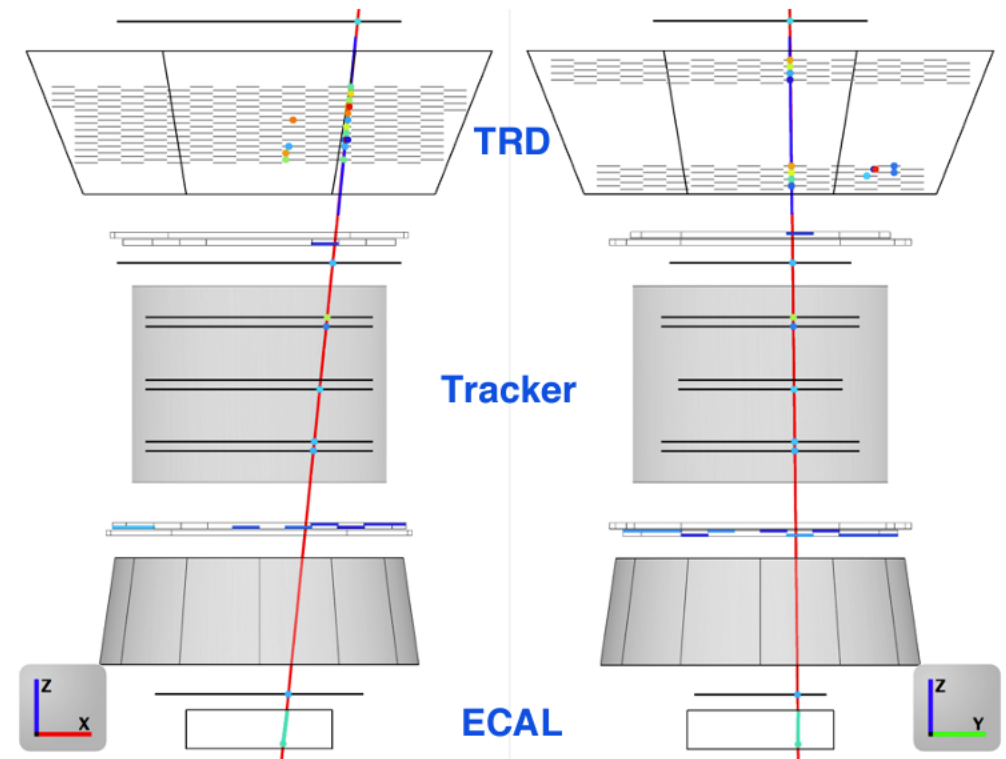
Phys. Rev. Lett. 116, 241105 (2016)

$e^+ / e^-$

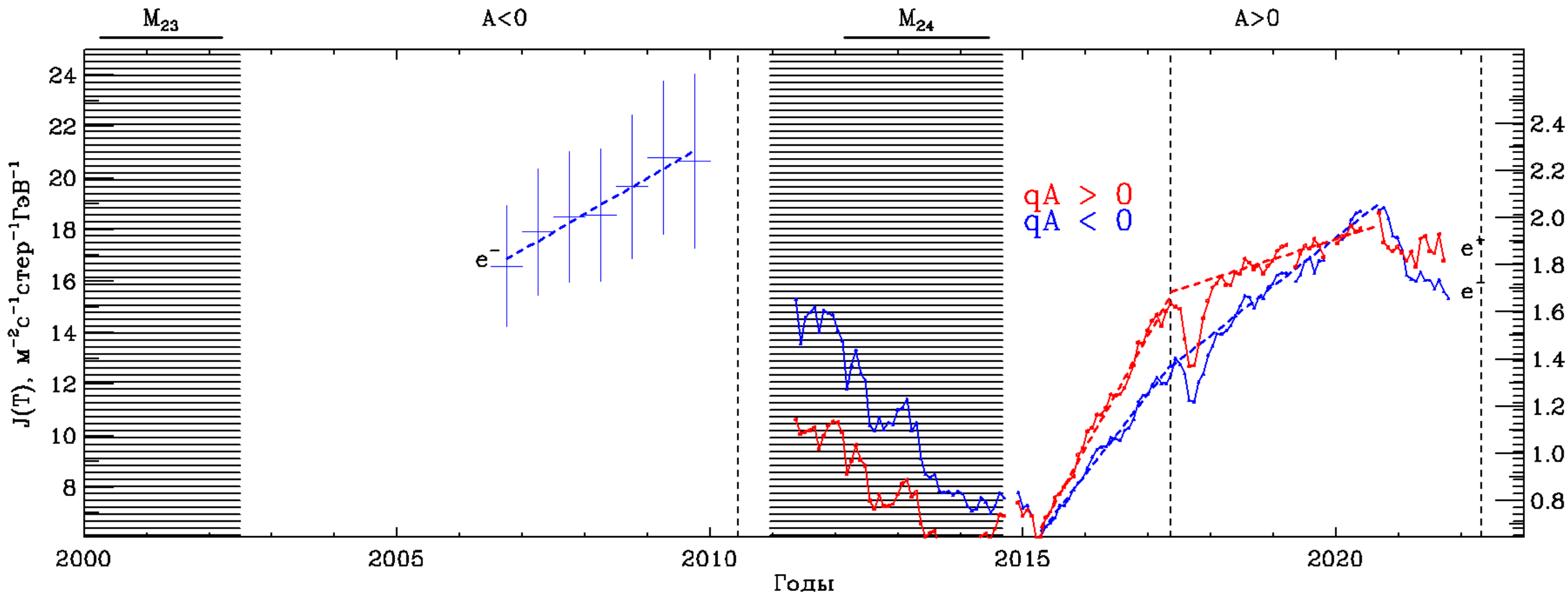


# AMS-02

- Регистрирует  $e^- e^+ > 1$  ГэВ
- Работает с 2011 г.
- Имеется TRD (детектор переходного излучения)



**Figure 1:** Event display of a 1.3 TeV electron passing through the AMS-02 detector.



( Период РАМЕЛА )

# Уравнение переноса КЛ в гелиосфере

ИНТЕНСИВНОСТЬ



**солнечная модуляция**  
частиц низких энергий

ИСТОЧНИКИ



$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\vec{V}_{sw} \cdot \nabla f - \langle \vec{v}_d \rangle \cdot \nabla f + \nabla \cdot (\mathbf{K}_s \cdot \nabla f) + \frac{1}{3} \left( \nabla \cdot \vec{V}_{sw} \right) \frac{\partial f}{\partial \ln P} + Q$$

солнечный ветер

дрейф частиц

диффузия

адиабат. расширение  
солнечного ветра

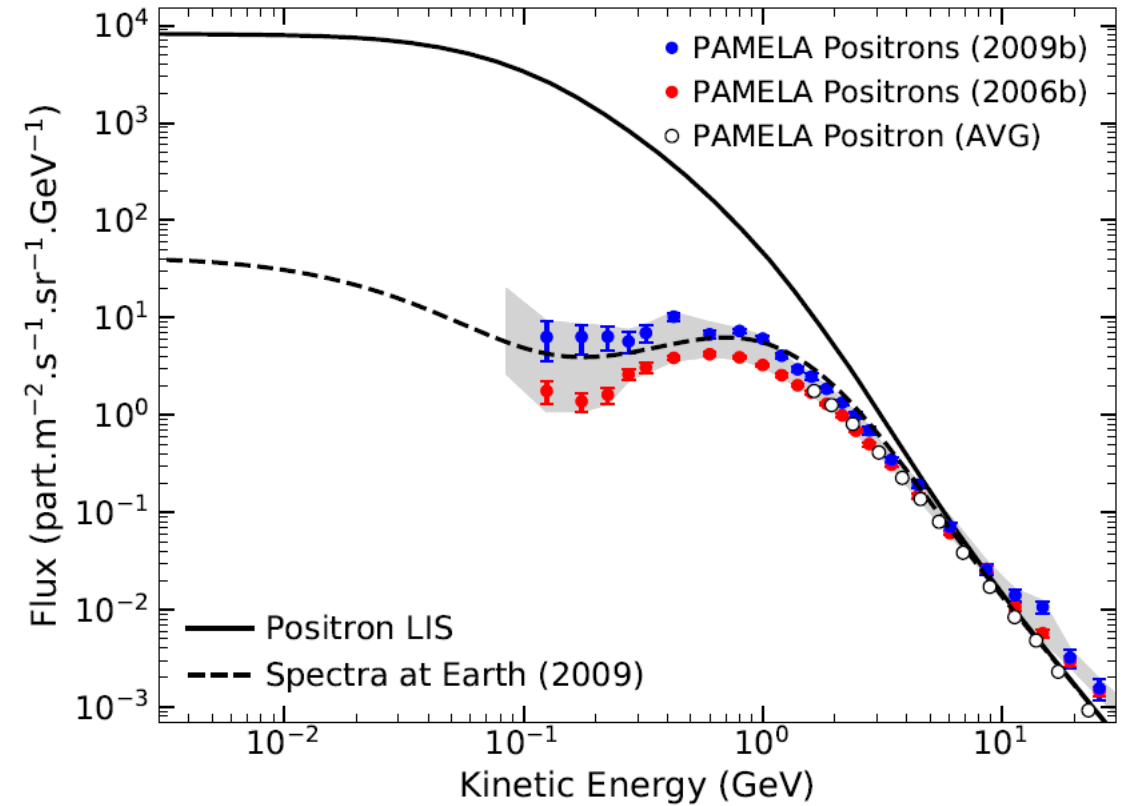
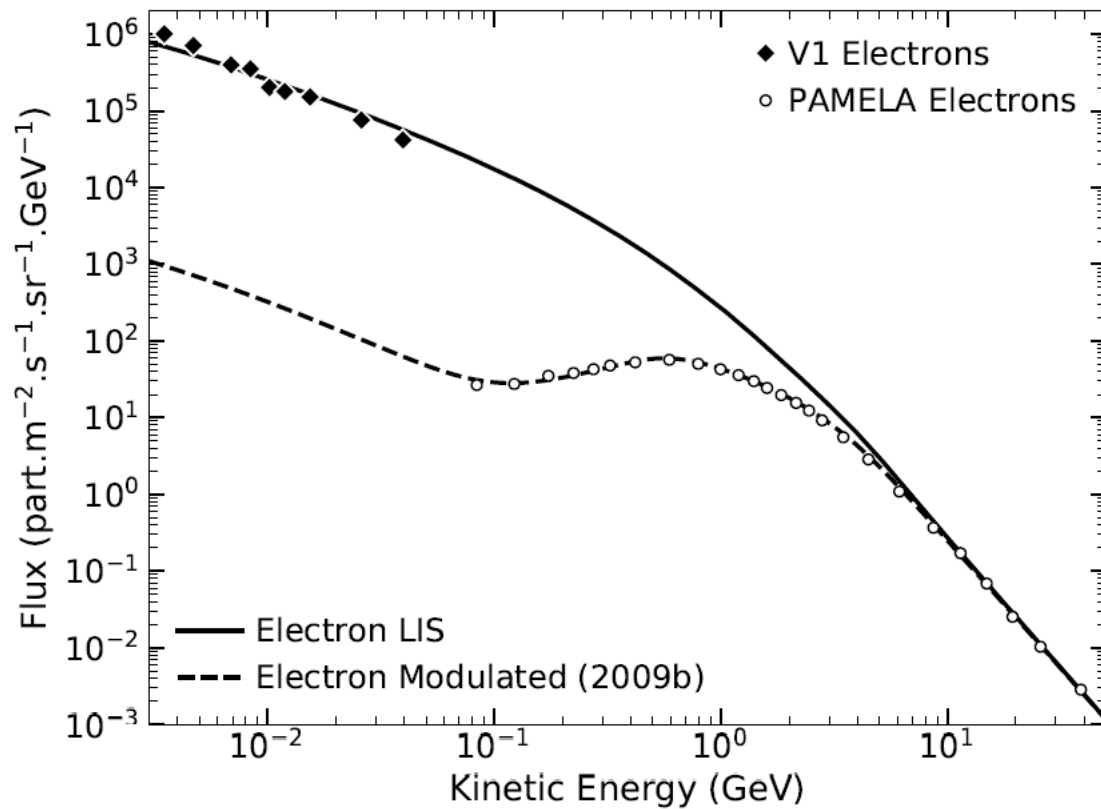


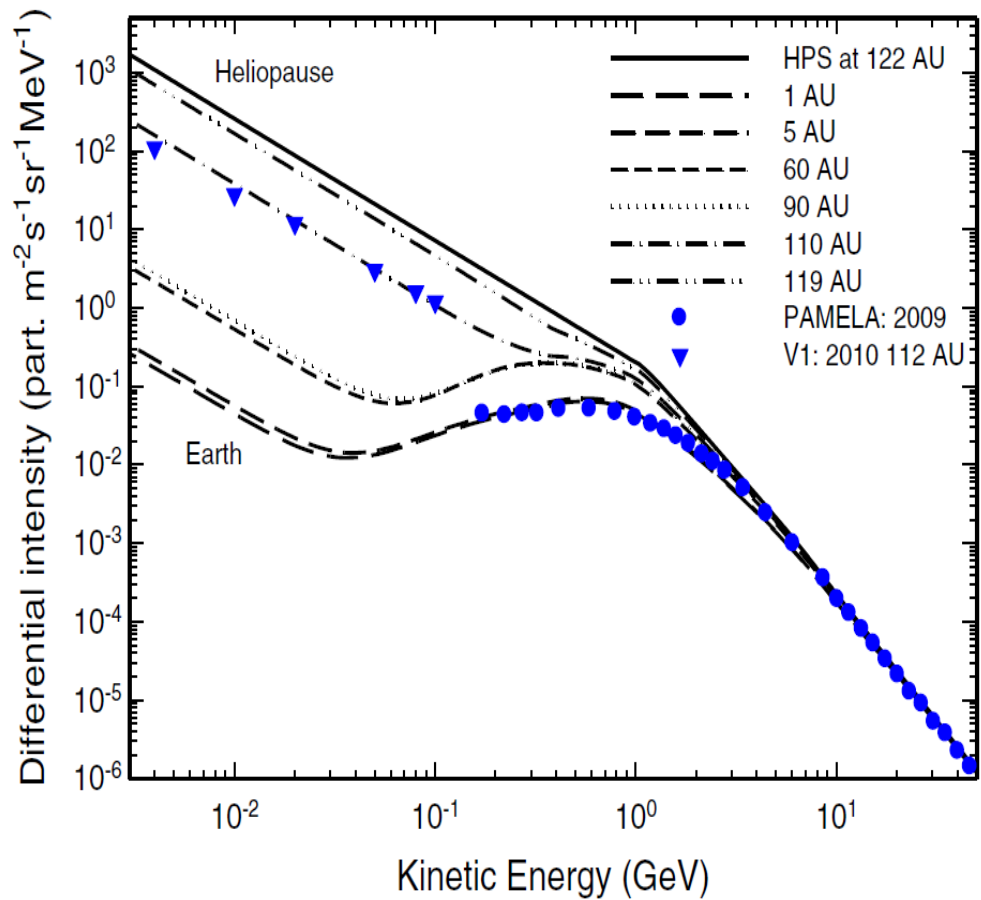
~ дает знакозарядовую  
зависимость модуляции

Паркер, 1965;

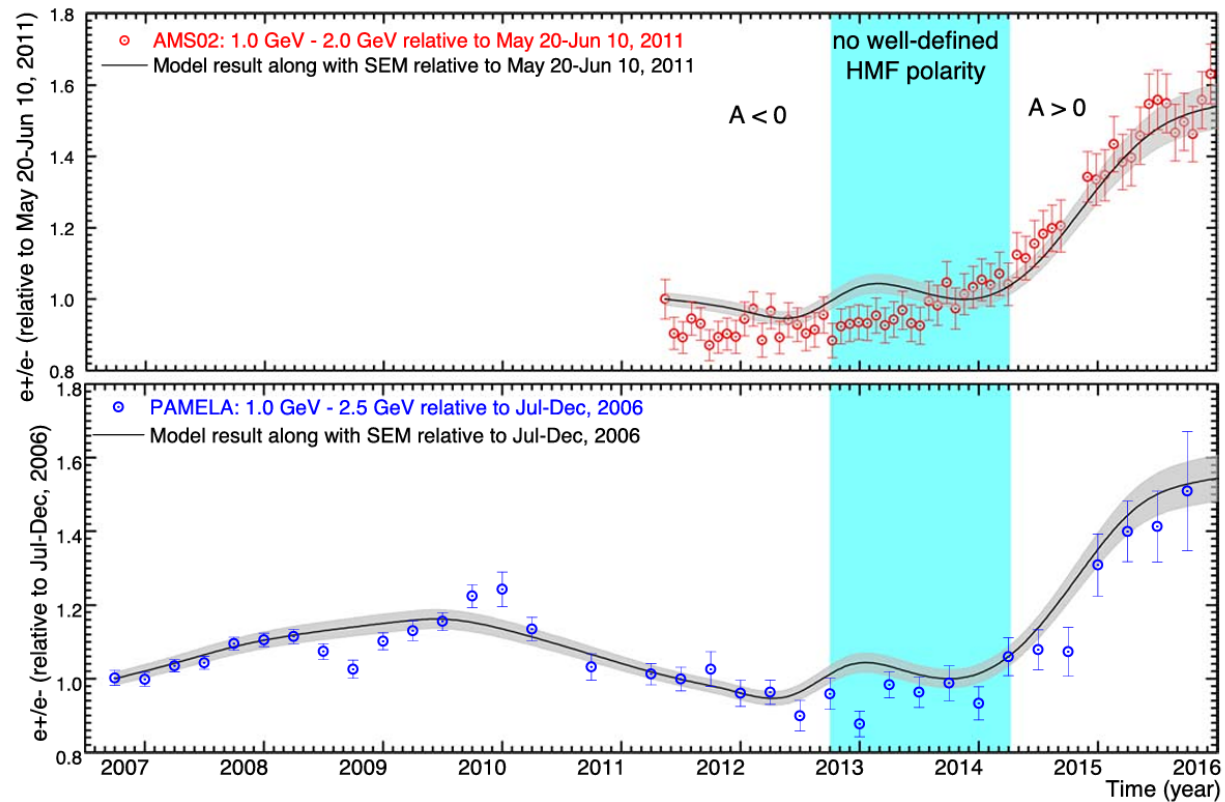
Потгитер и др., 2017 +

# Моделирование модуляции



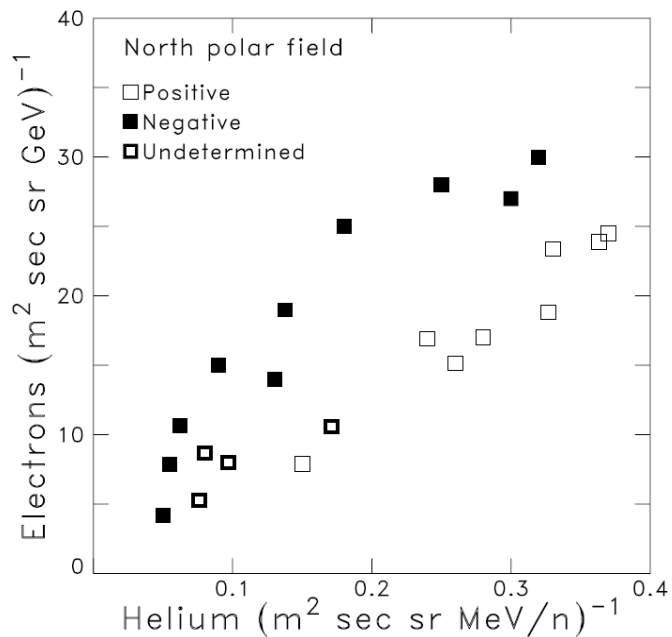
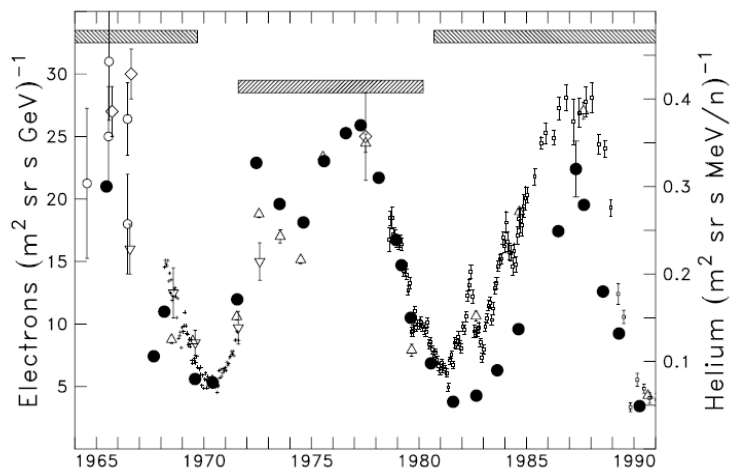


Potgieter (2014)

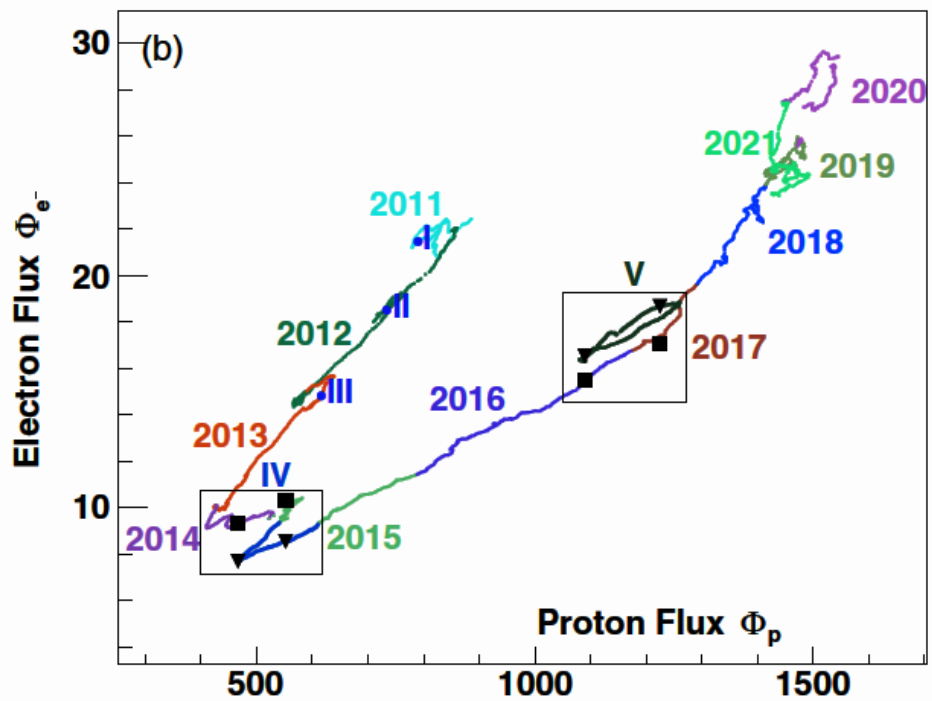
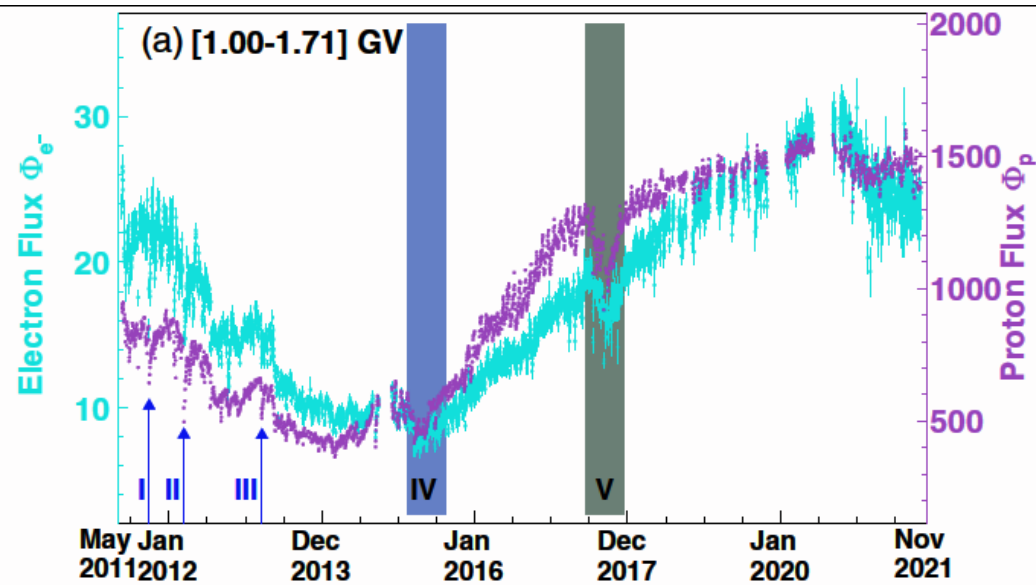


Aslam et al. // Astrophys. J. 909:215 (2021)

# Регрессии потоков КЛ разных зарядов

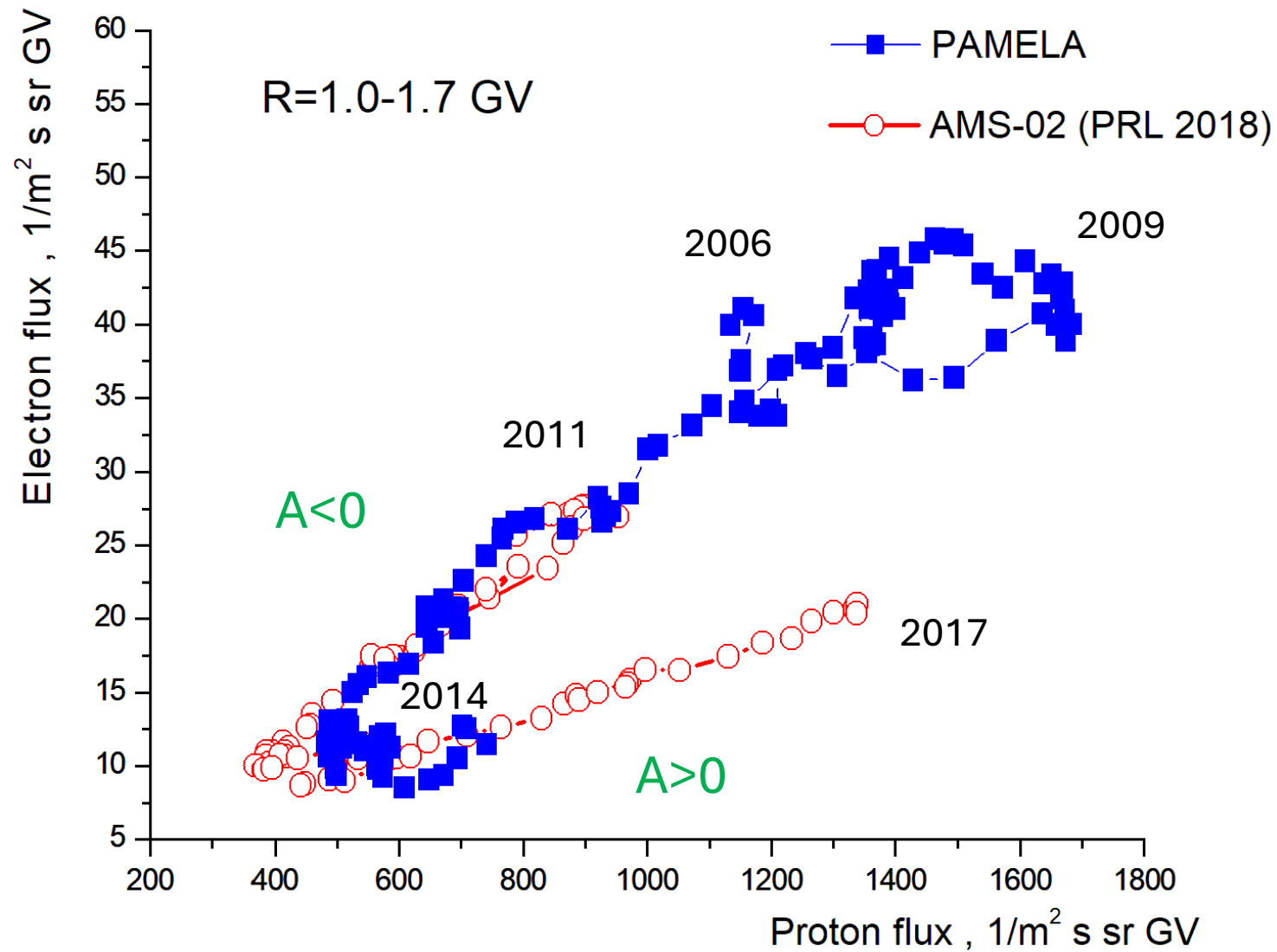


Evenson (1998)

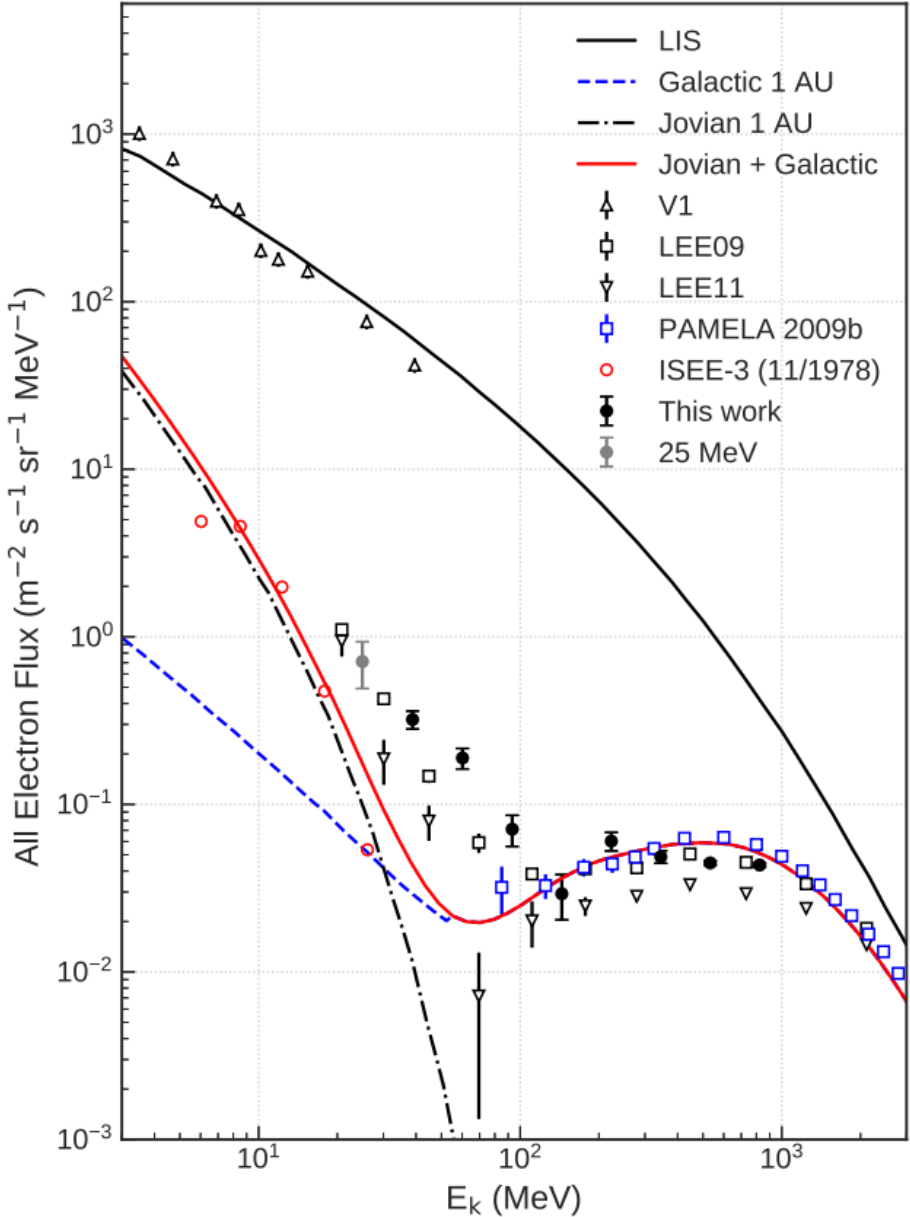


Phys. Rev. Lett. 130, 161001 (2023)



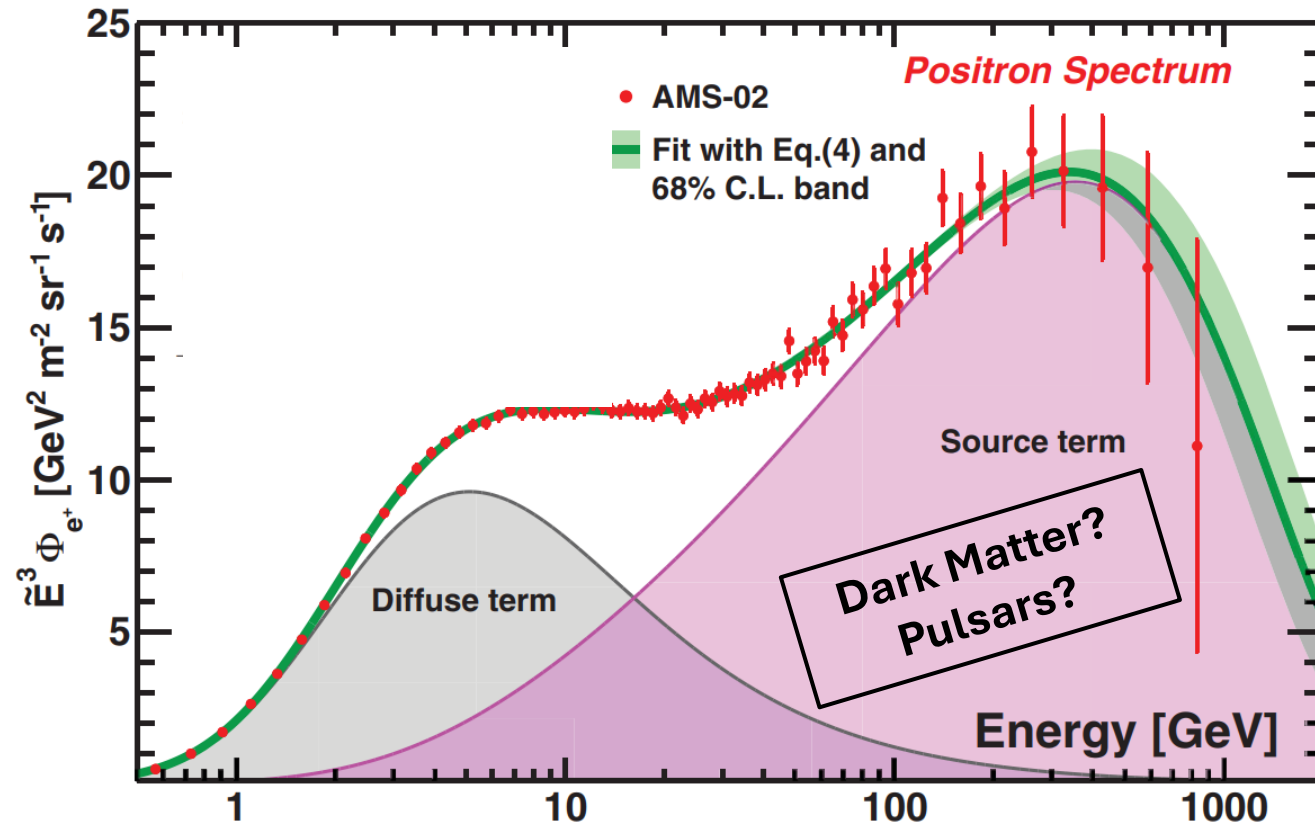


# Возможен вклад юпитерианских электронов



AESOP // Astrophys. J. 903:21 (2020)

# Избыток позитронов



Phys. Rev. Lett. 122, 041102 (2019)

- Сверхновые → образование вторичных частиц в межзвездной среде

Phys. Rev. Lett. 122, 041102 (2019)

- **Темная материя**

- Первичные черные дыры

Phys. Rev. Lett. 119, 021103 (2017)

Phys. Rev. Lett. 122, 041102 (2019)

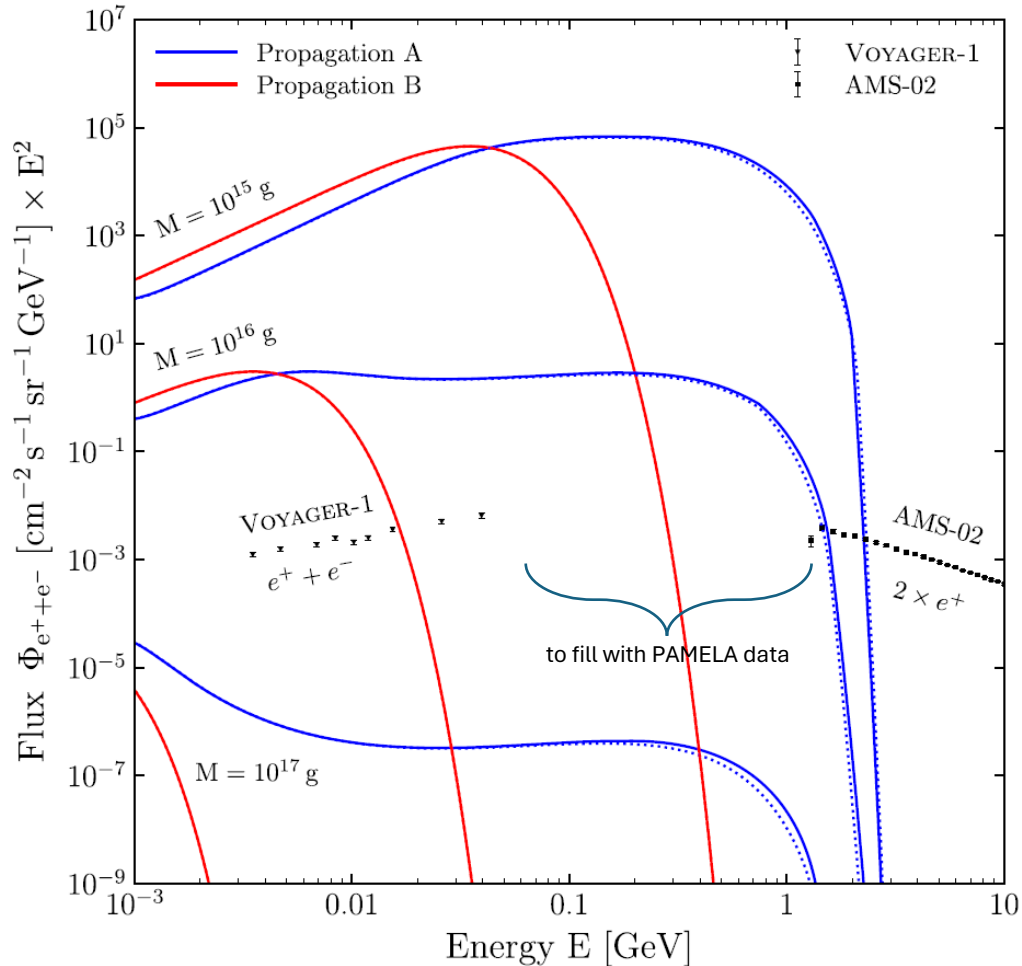
Nature Astr. 3, 485–486 (2019)

a.k.a. «The light side of dark matter»

Phys. Rev. Lett. 122, 041104 (2019)

←

...



# ИСТОЧНИКИ

# Моя работа

- **Потоки по РАМЕЛА**
  - до 1 ГэВ для  $e^-$  и  $e^+$  за 2006-2016
  - поиск особенностей / эффектов модуляции
- Машинное обучение (новая методика для увелич. статистики)
- Моделирование спектров
  - Интерпретация данных для проверки моделей модуляции