

# ПРИРОДА АНОМАЛЬНОГО ПОТОКА ПОЗИТРОНОВ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

Стожков Ю.И.

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
37 ВККЛ, Москва, [stozhkovyi@lebedev.ru](mailto:stozhkovyi@lebedev.ru)*

37 Всероссийская конференция по космическим лучам  
НИИЯФ МГУ, 27 июня - 2 июля, 2021

# Абстракт

За последние ~15 лет в космических экспериментах ПАМЕЛА и АМС-02 получены достаточно точные данные о потоках и энергетических спектрах электронов и позитронов.

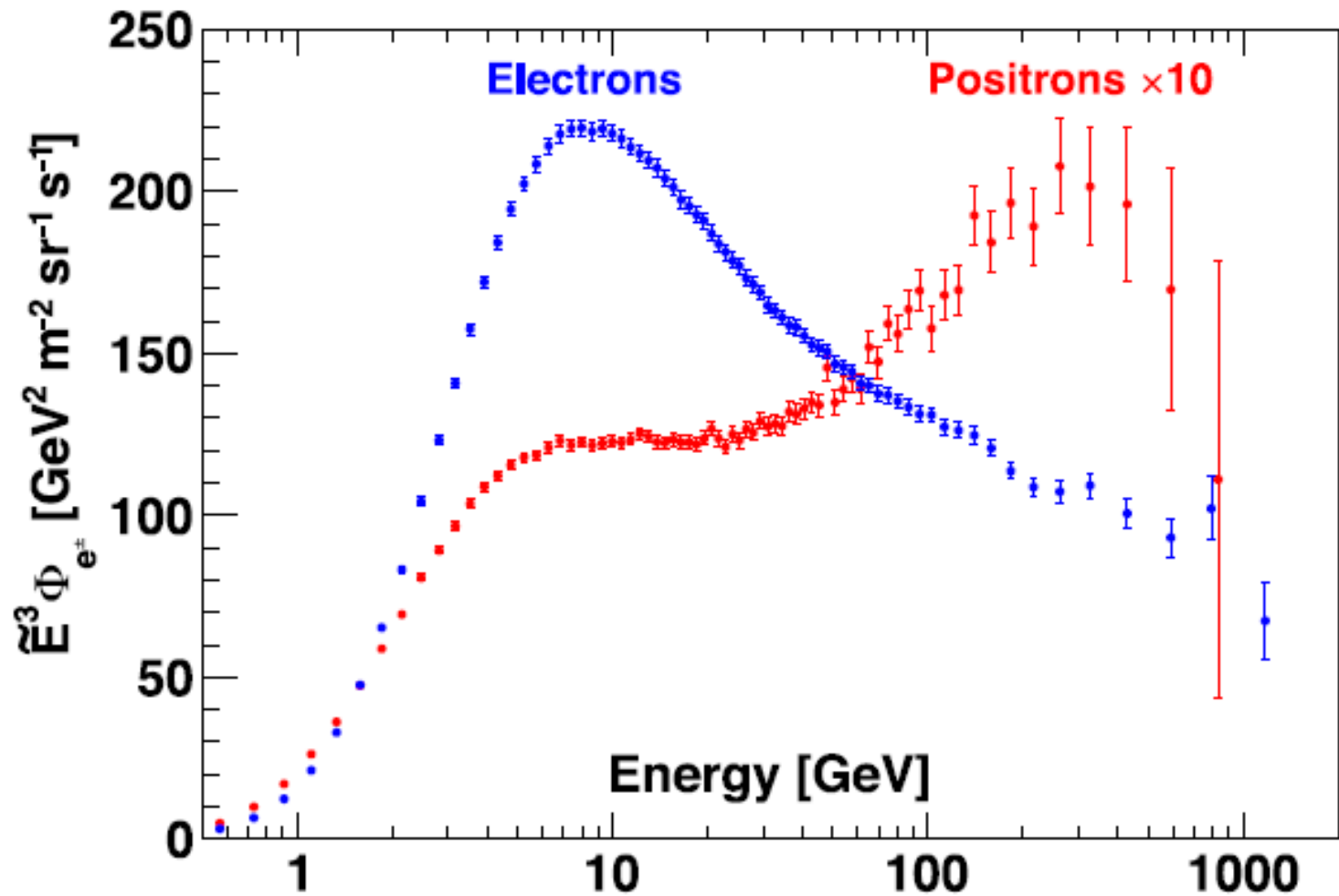
Наша Галактика состоит из вещества. Античастицы имеют вторичное происхождение. Оценки и расчеты показывают, что отношение потоков  $r = J_{e^+} / (J_{e^-} + J_{e^+}) \sim E^{-0.3}$ . Экспериментальные данные, дают падение величины  $r$  в интервале  $E \approx (1 - 8)$  ГэВ, затем наблюдается рост значений  $r$  до  $E \approx 300$  ГэВ. Для частиц с  $E > 300$  ГэВ величина  $r$  существенно уменьшается. Экспериментальные данные свидетельствуют о дополнительном потоке  $e^+$  в интервале  $E \approx (8 - 300)$  ГэВ. Откуда берется этот аномальный (дополнительный) поток  $e^+$ ?

Предполагается, что источниками КЛ являются вспышки на активных карликовых звездах, которые генерируют частицы вплоть до  $E \approx (10^{13} - 10^{14})$  ГэВ. Карликовые звезды составляют основное звездное население Галактики, а энергетики этих звездных вспышек достаточно, чтобы обеспечить необходимую плотность энергии КЛ.

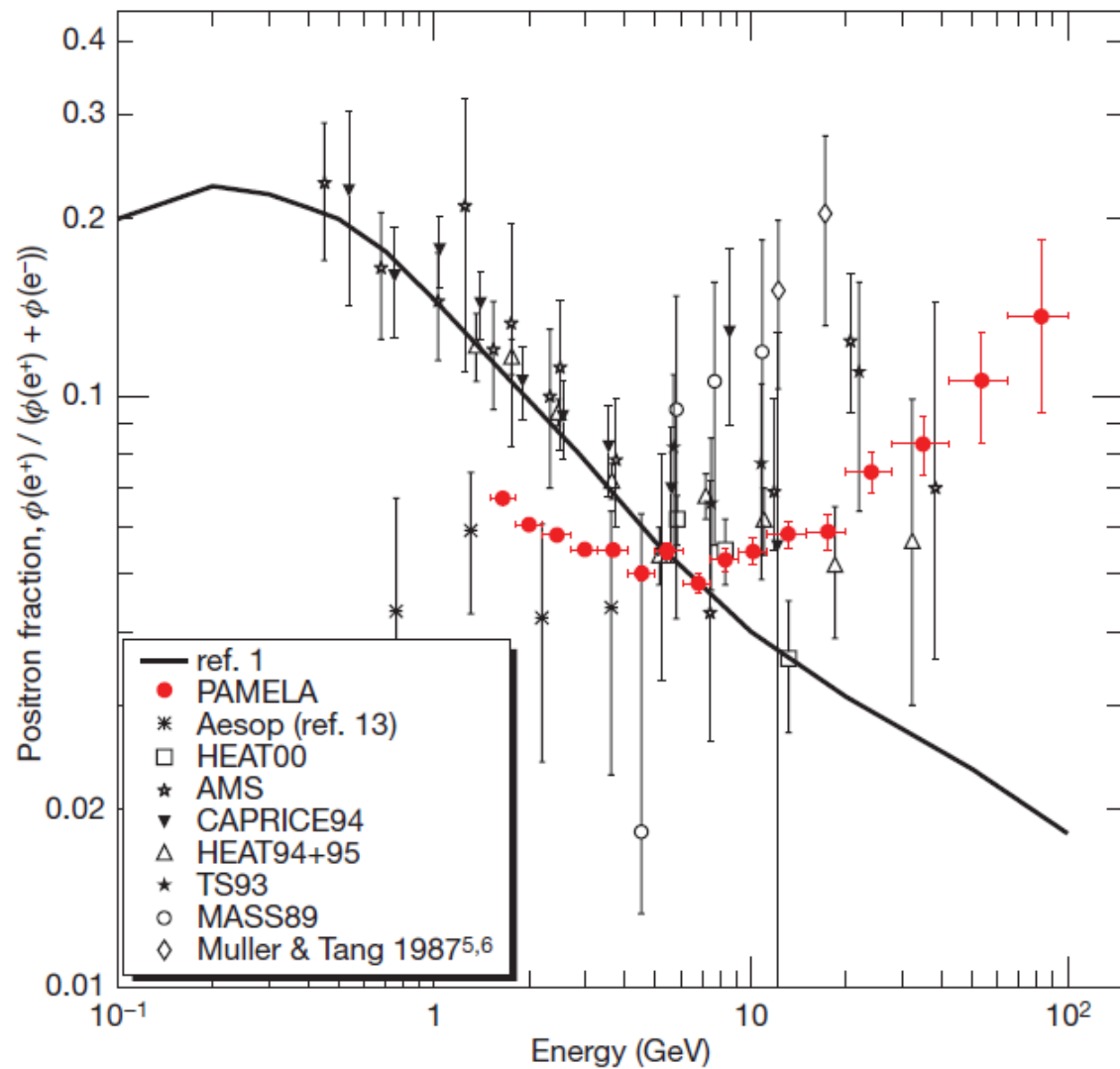
При звездной вспышке основная часть ускоренных частиц уходит в галактическую среду, часть попадает на фотосферу звезды. Эти частицы испытывают ядерные взаимодействия со звездным веществом. Образуются вторичные частицы, в том числе пионы  $\pi^0$ ,  $\pi^\pm$ .  $\pi^+$  распадаются ( $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ ) и дают дополнительный поток  $e^+$ .

Звездные вспышки происходят в областях с сильным магнитным полем. Вероятность выхода ускоренных частиц в межзвездную среду растет с ростом их энергии. Обрезание спектра позитронов, наблюдаемое при  $E > 300$  ГэВ, обусловлено максимальной энергией ускоренных в звездной вспышке частиц, которая составляет  $E \approx (10^{13} - 10^{14})$  ГэВ.

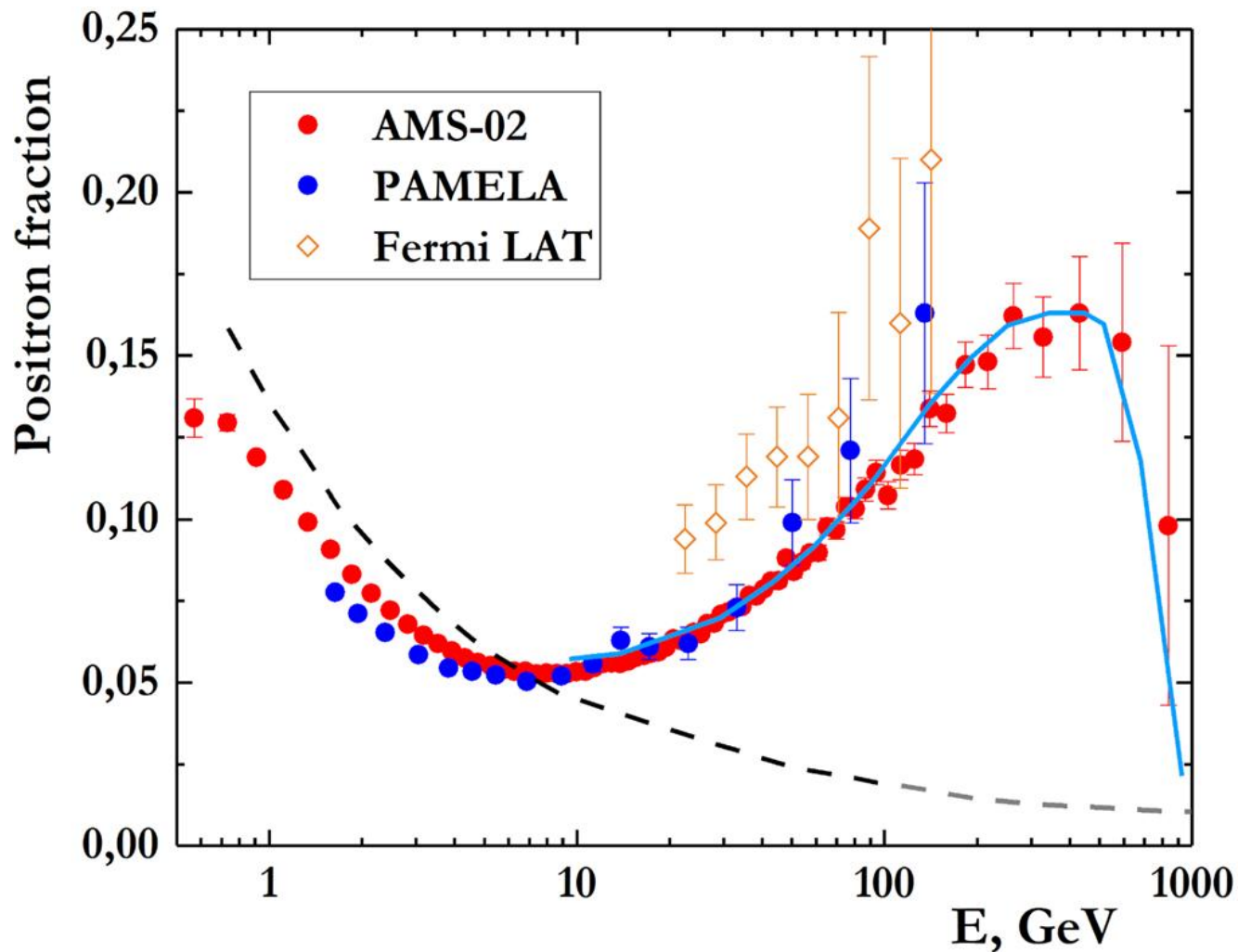
Этот сценарий позволяет объяснить природу аномальной компоненты позитронов, наблюдаемой в космических лучах.



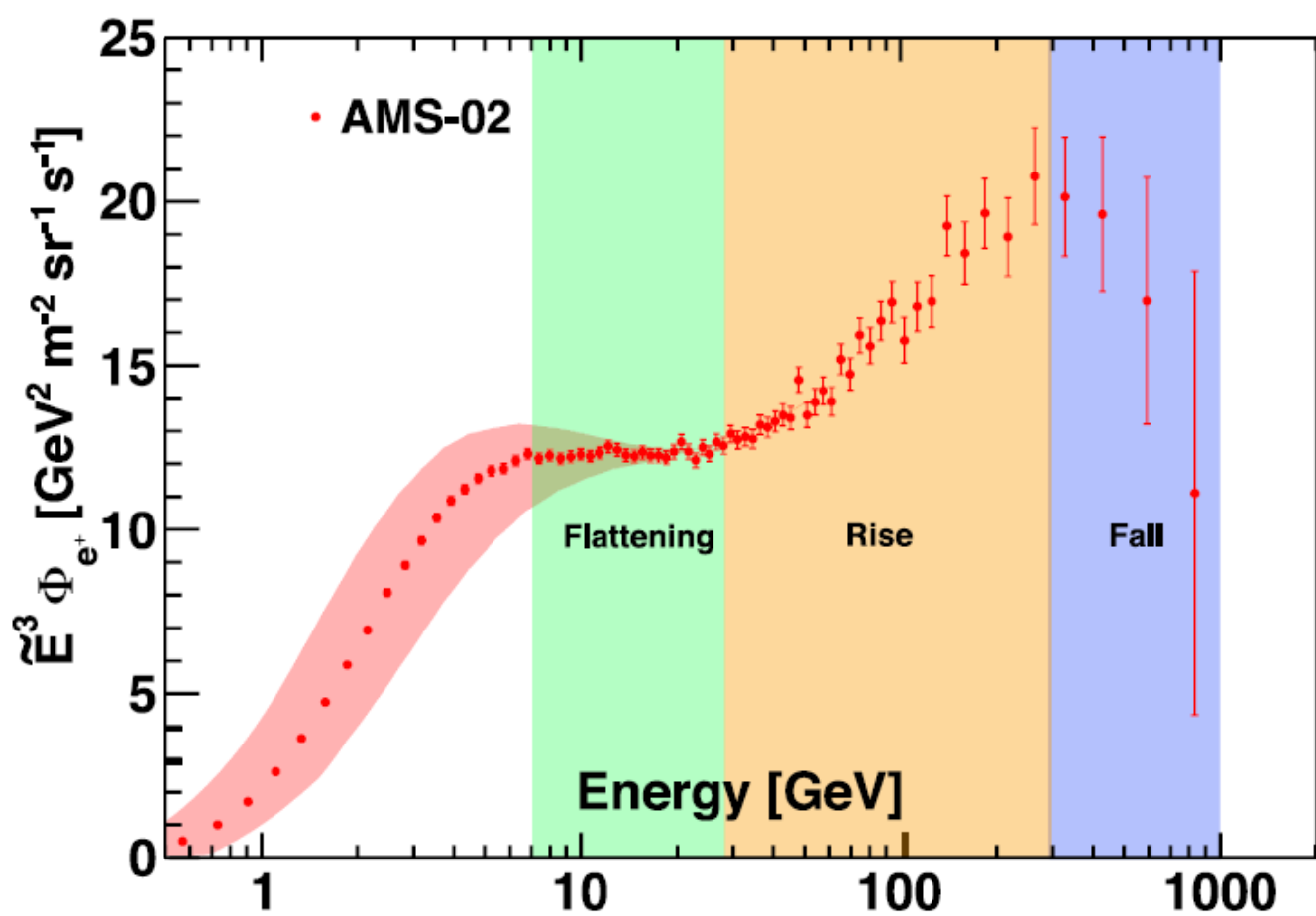
The measured positron spectrum ( $E^3 \Phi_{e^+}$ , red data points multiplied by 10) compared to the electron spectrum ( $E^3 \Phi_{e^-}$ , blue data points). For display purposes the electron data point at  $\sim 830$  GeV is slightly shifted horizontally to avoid overlap with the positron point. As seen, the positron spectrum has distinctly different magnitude and energy dependence compared to that of electrons. (M. Aguilar, L. Ali Cavazonza, G. Ambrosi, et al. The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II—Results from the first seven years. *Physics Reports*, 894 (2021) 1–116), <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.09.003>).



**PAMELA positron fraction with other experimental data and with secondary production model. The positron fraction measured by the PAMELA experiment compared with other recent experimental data. The solid line shows a calculation<sup>1</sup> for pure secondary production of positrons during the propagation of cosmic rays in the Galaxy without reacceleration processes. Error bars show 1 s.d.; if not visible, they lie inside the data points. (O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya et al. Nature, Vol 458|607 - 609|2 April 2009| doi:10.1038/nature07942)**

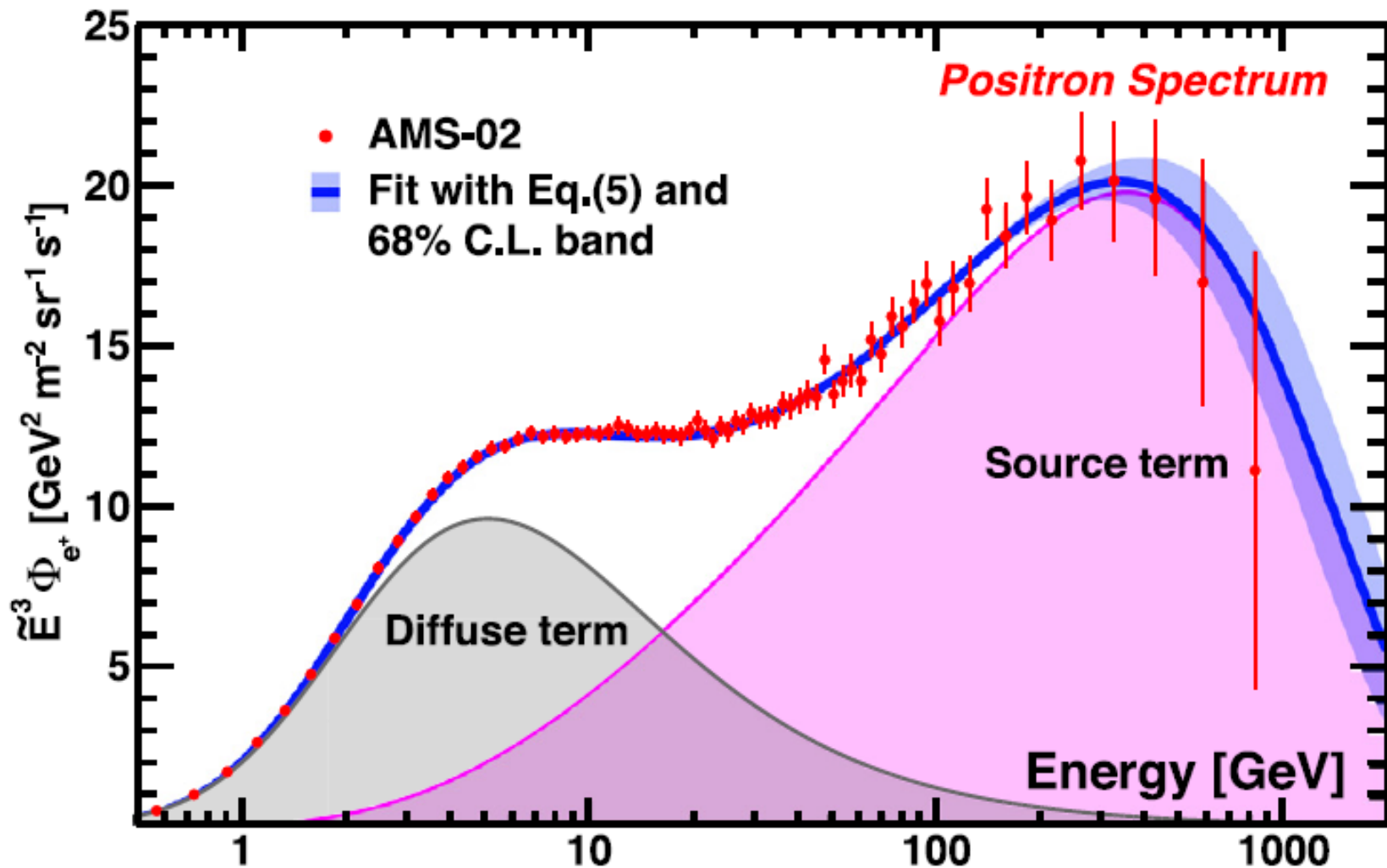


The positron fraction as measured by PAMELA, AMS, Fermi-LAT. Dashed line shows model predictions from Moskalenko & Strong (1998). Blue line shows the result of calculations of ratio fluxes of  $e^+$  to  $(e^+ + e^-)$  versus energy if the probability of positron release from stellar flare site is taken into account. (V.G. Sinitsyna, et al. Red dwarf stars as a new source type of galactic cosmic rays. *Astronomische Nachrichten*, 2021;1–5. DOI: 10.1002/asna.202113931)

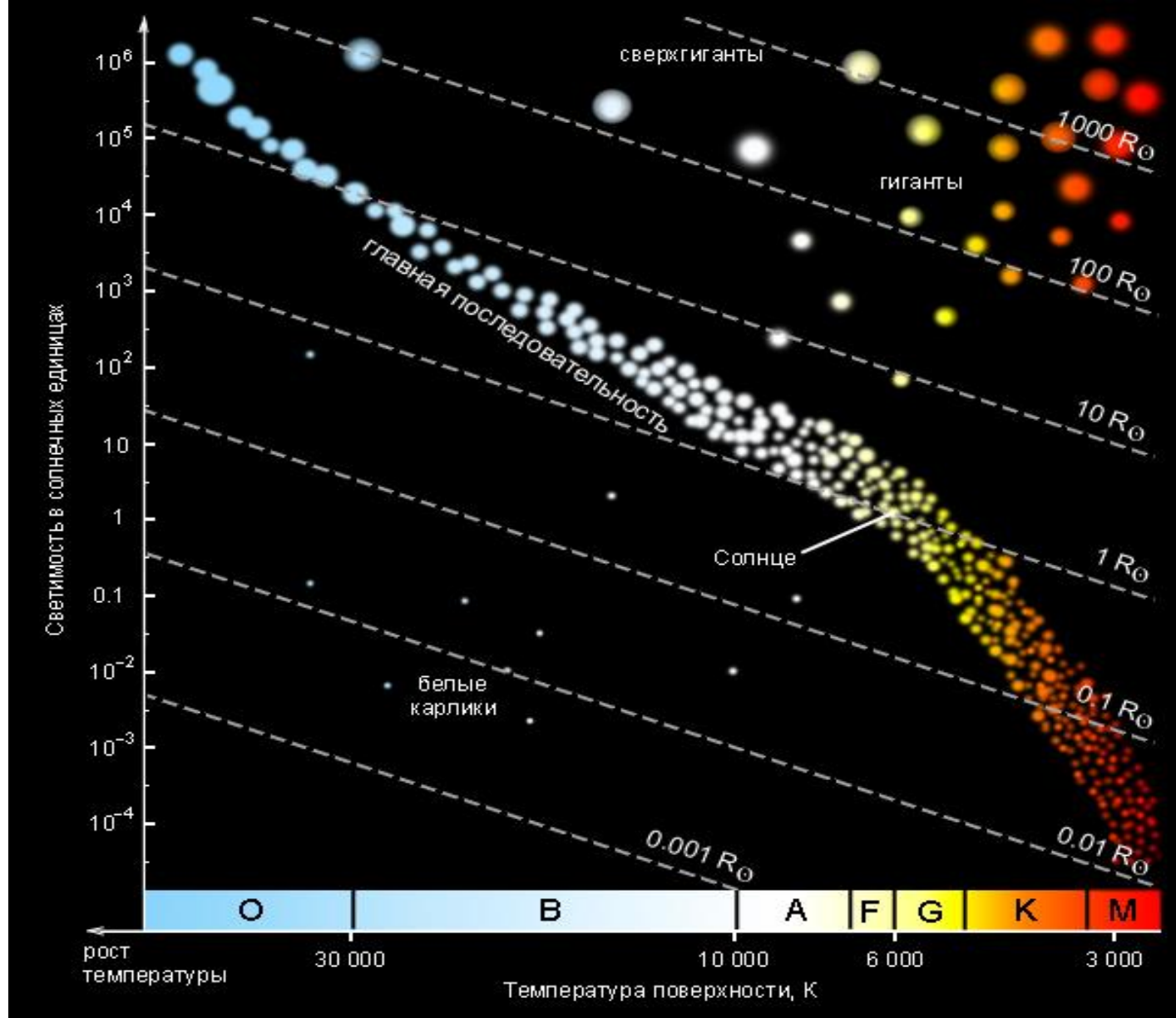


The AMS positron spectrum,  $E^3\Phi_{e^+}$  (red data points) is shown as a function of energy.  $E$  is the spectrally weighted mean energy for a flux proportional to  $E^{-3}$ . The time variation of the flux at low energies due to solar modulation is indicated by the red band. To guide the eye, the vertical color bands indicate the energy ranges corresponding to changing behavior of the spectrum: flattening, rising, and falling.

(M. Aguilar, L. Ali Cavazonza, G. Ambrosi, et al. The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II— Results from the first seven years. *Physics Reports*, 894 (2021) 1–116), <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.09.003>



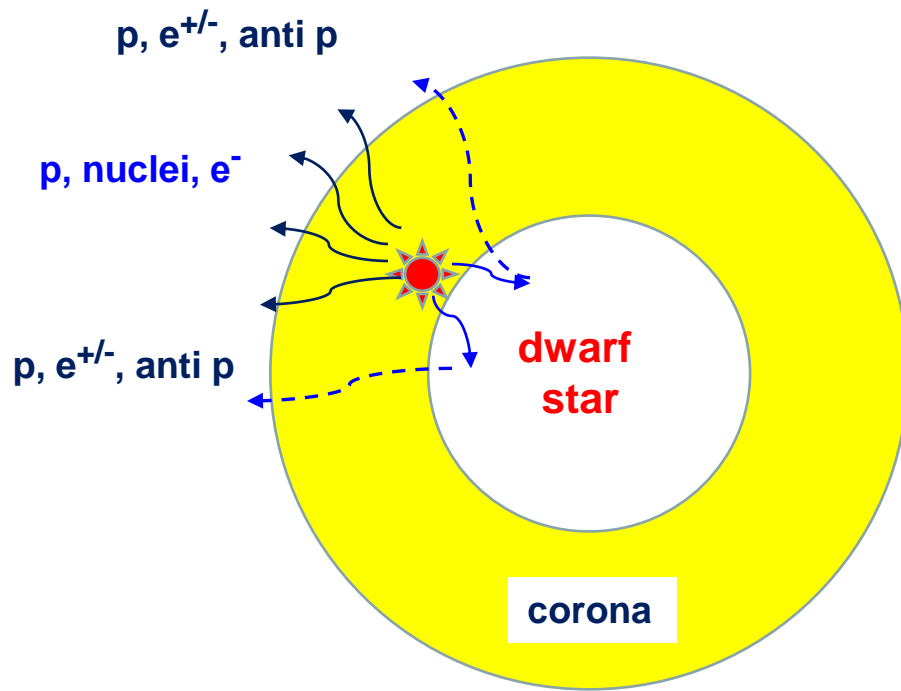
The fit (blue line) to the positron flux in the energy range [0.5 – 1000] GeV together with the 68% C.L. interval (blue band). The exponential cutoff of the source term is determined from the fit to be  $810^{+310}_{-180}$  GeV. The red data points represent the measured positron spectrum. The source term contribution is represented by the magenta area, and the “diffuse” term contribution by the gray area.



Число звезд в Галактике  $(2-4) \cdot 10^{11}$

W или WR — звёзды Вольфа — Райе, очень тяжёлые яркие звёзды с температурой порядка 70000 К и интенсивными эмиссионными линиями в спектрах.

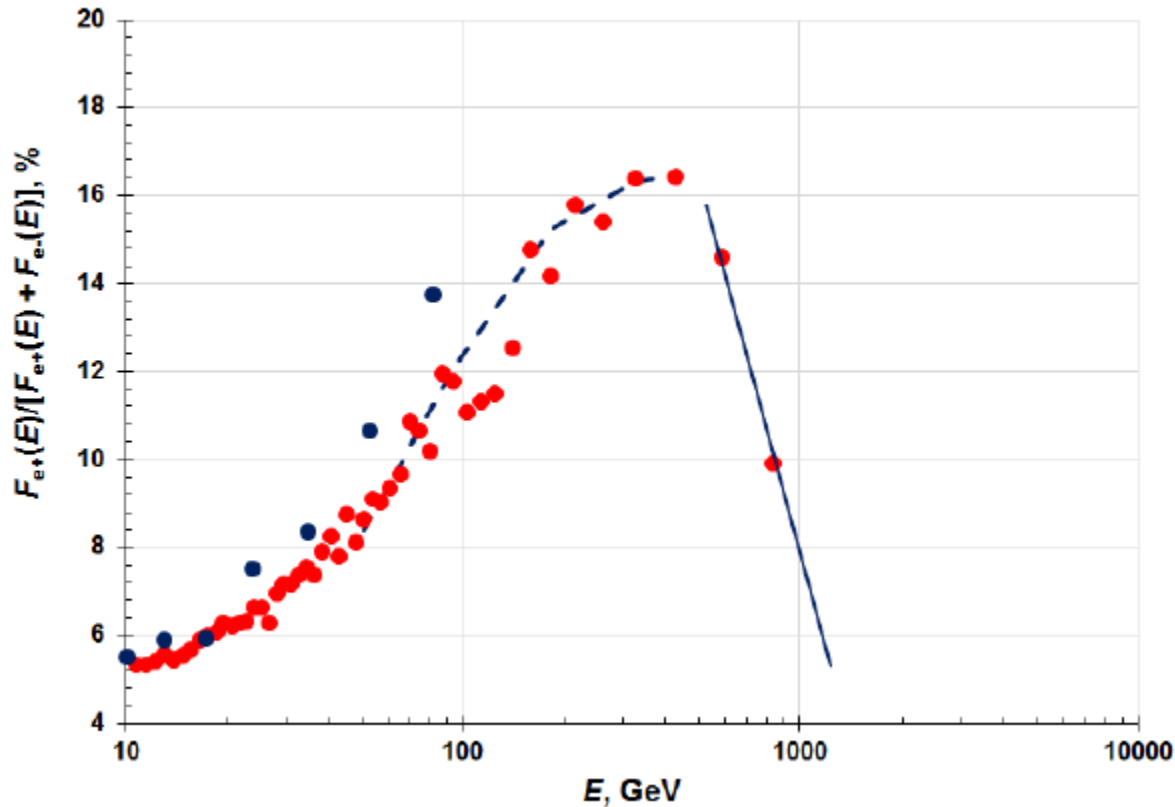




Active dwarf star, e.g., red dwarf. In its corona (yellow color) there are strong magnetic fields. Stellar flare occurred (red star on the left side). The P, nuclei, e<sup>-</sup> were accelerated (see black arrows). A small fraction of these particles fell on the stellar photosphere and interacted with stellar matter (mainly stellar protons). As a result we have charged and neutral pions, protons and anti-protons (small fraction). Pions decay:  $(\pi^{+/-}) \longrightarrow (\mu^{+/-}, \nu)$ ;  $\mu^{+/-} \longrightarrow (e^{+/-}, 2\nu)$ ;  $(\pi^0) \longrightarrow (2\gamma)$ . Thus, we have the additional flux of positrons and antiprotons. The

stellar flares arise in the regions with strong magnetic field. The resulting particles have a chance to escape into space if their energy is large enough. Let us introduce the function of the probability of particle release into the interstellar medium. This probability increases with the energy increase and it is about 100% at high energies. In the stellar flare there is maximum energy of accelerated particles  $E_{\text{max}}$  (e.g., protons). The secondary particles have the energy about  $\sim (20-30)\%$  of  $E_{\text{max}}$ . The extra positron flux disappears at the energy about several TeV. In this case  $E_{\text{max}}$  of the accelerated protons is about 10 TeV. The break in the spectra of protons and nuclei is recorded. About secondary electrons, this flux is small in comparison with the primary accelerated electron one. Also the small flux of secondary anti protons from flare protons will be observed.

(M. Aguilar, L. Ali Cavazonza, G. Ambrosi, et al. The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II— Results from the first seven years. Physics Reports, 894 (2021) 1–116).



The ratio of positron flux  $F_{e^+}(E)$  to the sum of electron  $F_{e^-}(E)$  and positron fluxes versus energy of these particles. Blue points are the PAMELA data and red points are the AMS-02 data. The errors of the points were omitted. The dashed line shows the result of calculations of ratio fluxes of  $e^+$  to  $(e^+ + e^-)$  versus energy when the probability of positron release from stellar flare site was taken into account. The line on the right side was drawn by hand. As the calculations show, the maximum energy of positrons will be in 5 times less than the maximum energy of protons accelerated in a stellar flare (prof. Dedenko L.G. - private communication).

функция прозрачности  
 $f(E) = 1 - \exp(-0.014E)$

# Выводы

**Источником** дополнительного потока позитронов в КЛ являются звездные вспышки на карликовых звездах. В них ускоряются протоны до  $E = 10^{13} - 10^{14}$  эВ.

**Частицы**, ускоренные в звездных вспышках, могут обеспечить необходимую плотность энергии КЛ в Галактике.

**Часть ЗКЛ** попадает на фотосферу звезды, взаимодействует с ее веществом, образуя  $\pi^0$ ,  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ . Дополнительный поток  $e^+$  образуется через распад  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ e^+$ .

СПАСИБО

