



Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Институт ядерной физики и технологий
Кафедра физики элементарных частиц №40

Выпускная квалификационная работа студента на тему

Исследование влияния пространственного распределения скрытой массы на объяснение с ее помощью позитронной аномалии в космических лучах

Студент

П.А. Коршунова

Научный руководитель

К.М. Белоцкий

Научный консультант

М.Л. Соловьёв

Москва 2023

Проблема современной астрофизики

Позитронная аномалия



Модели нестабильной скрытой массы



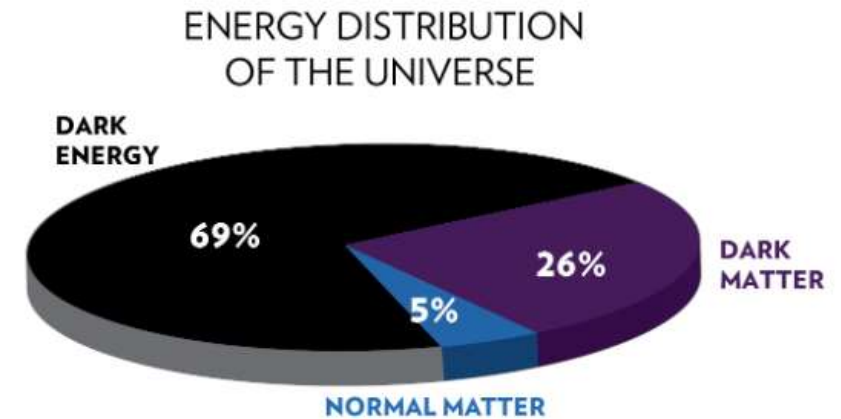
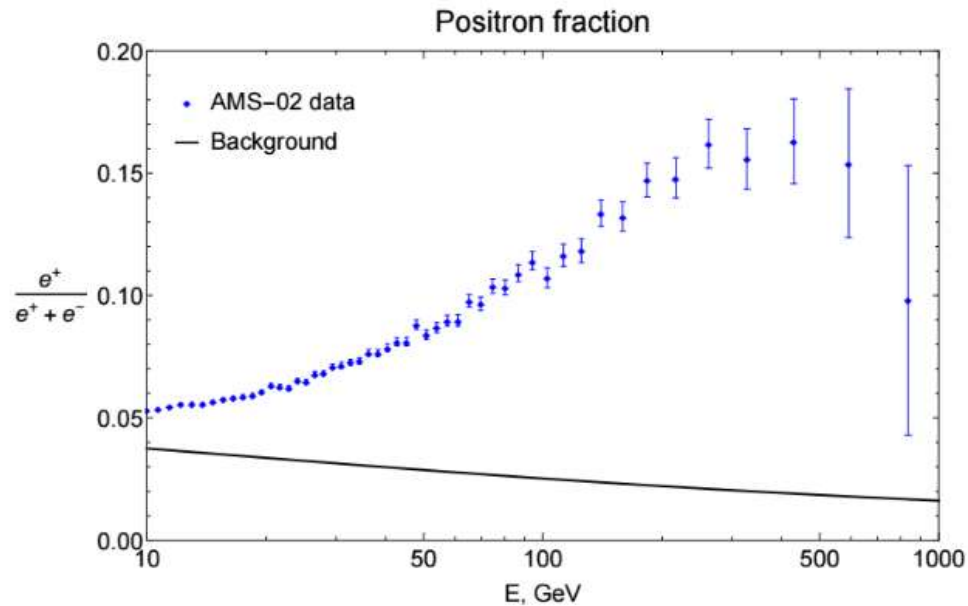
Перепроизводство гамма-излучения



Изменение пространственного
распределения источников

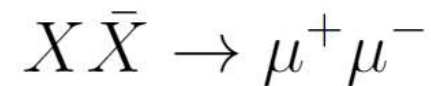
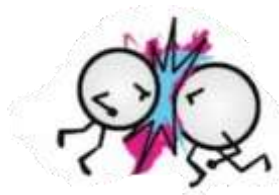


Позитронная аномалия и скрытая масса



Скрытая масса – форма материи, не взаимодействующая с электромагнитным излучением

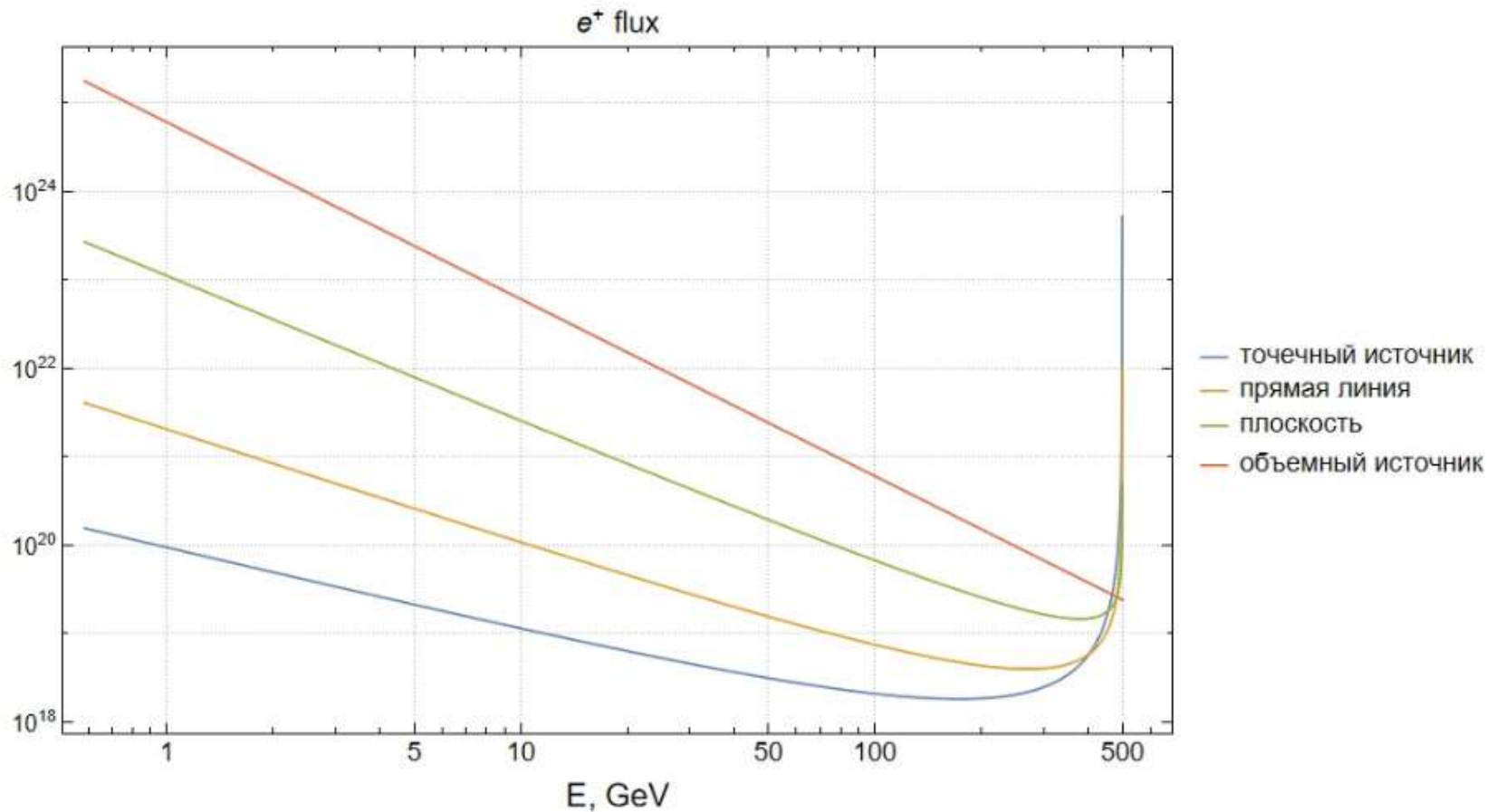
Аннигиляция частиц скрытой массы



$$\lambda(E, E_0) = 10 \text{кpc} \sqrt{\left(\frac{E}{1 \text{ГэВ}}\right)^{-0.7} - \left(\frac{E_0}{1 \text{ГэВ}}\right)^{-0.7}}$$

$$\Phi(E) = \frac{c}{4\pi} \frac{1}{\beta E^2} \int_E^{E_{0\text{max}}} \frac{dE_0}{(\pi \lambda^2(E, E_0))^{3/2}} \int d^3 \vec{r} Q(E_0, \vec{r}) e^{-\frac{\vec{r}^2}{\lambda^2(E, E_0)}},$$

Энергетический спектр позитронов для различного пространственного распределения источников, проходящих через наблюдателя

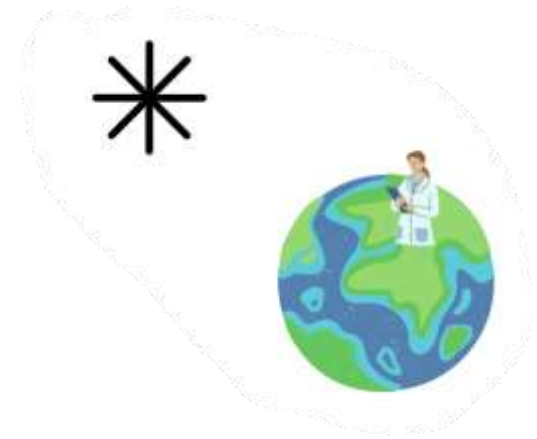
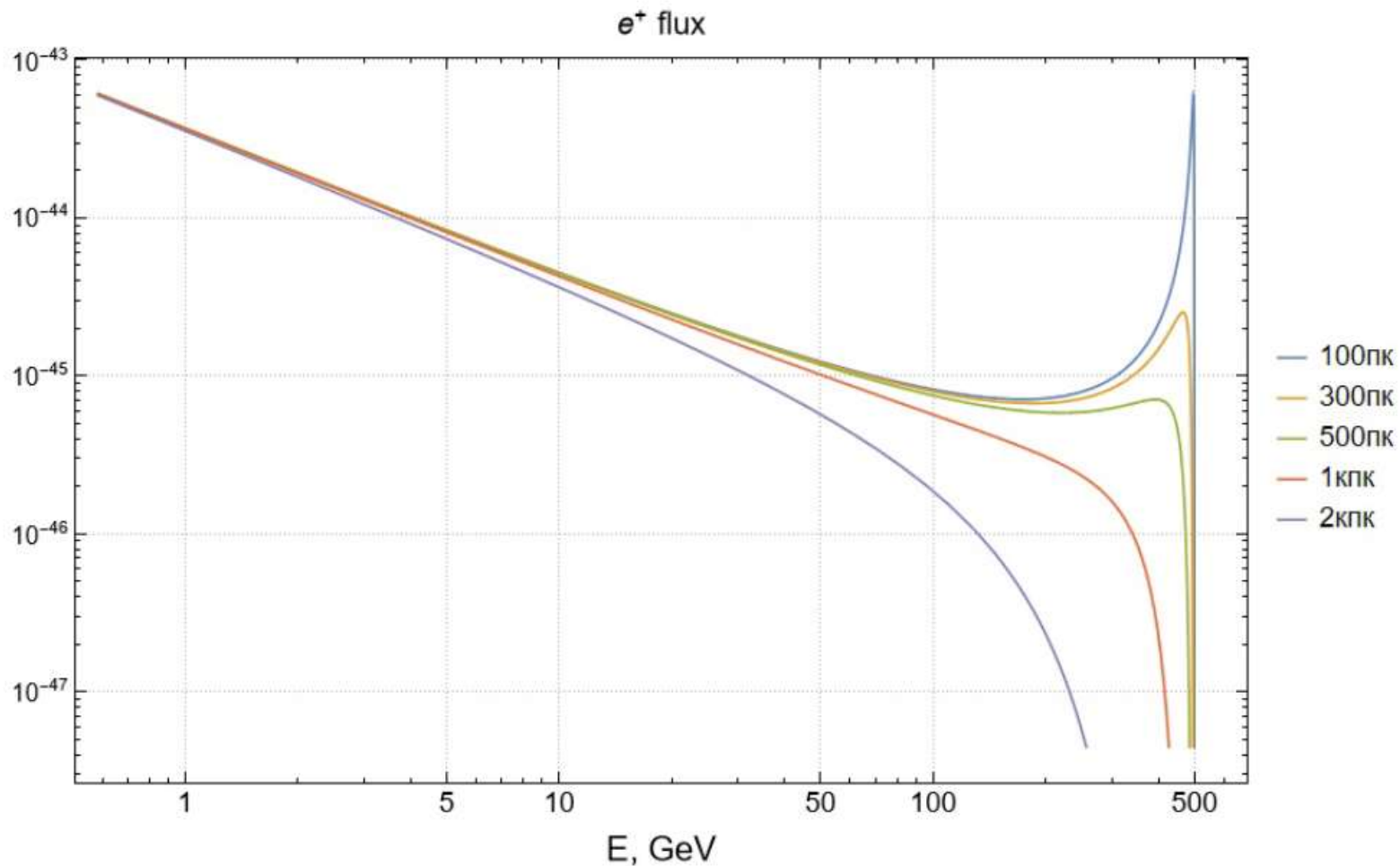


Энергетический спектр от одной реакции аннигиляции – **дельта-функция**

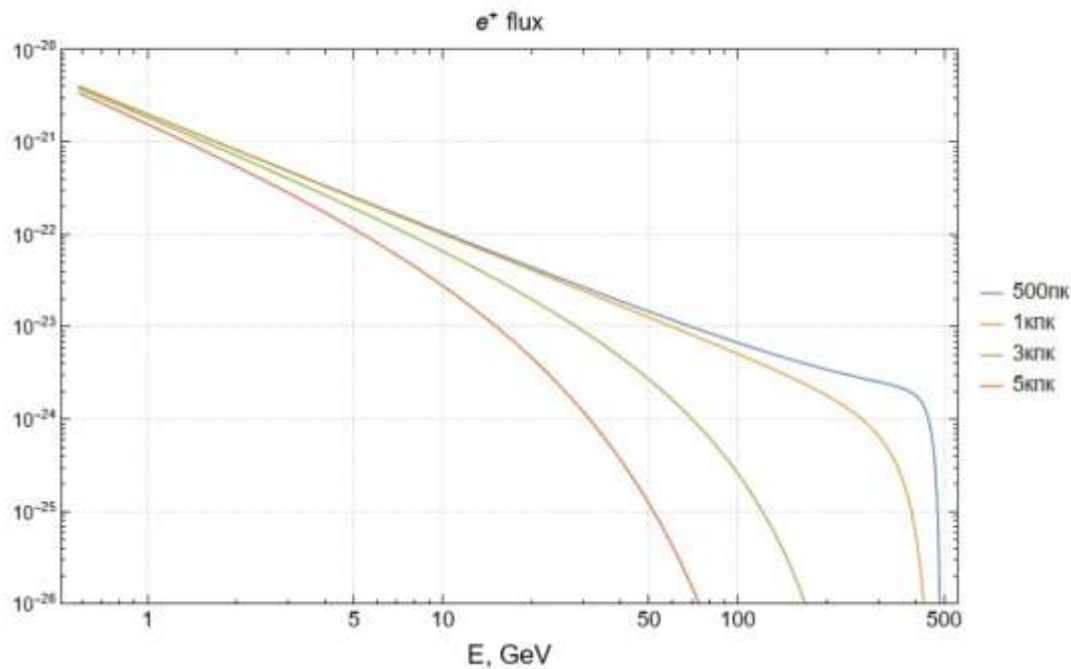
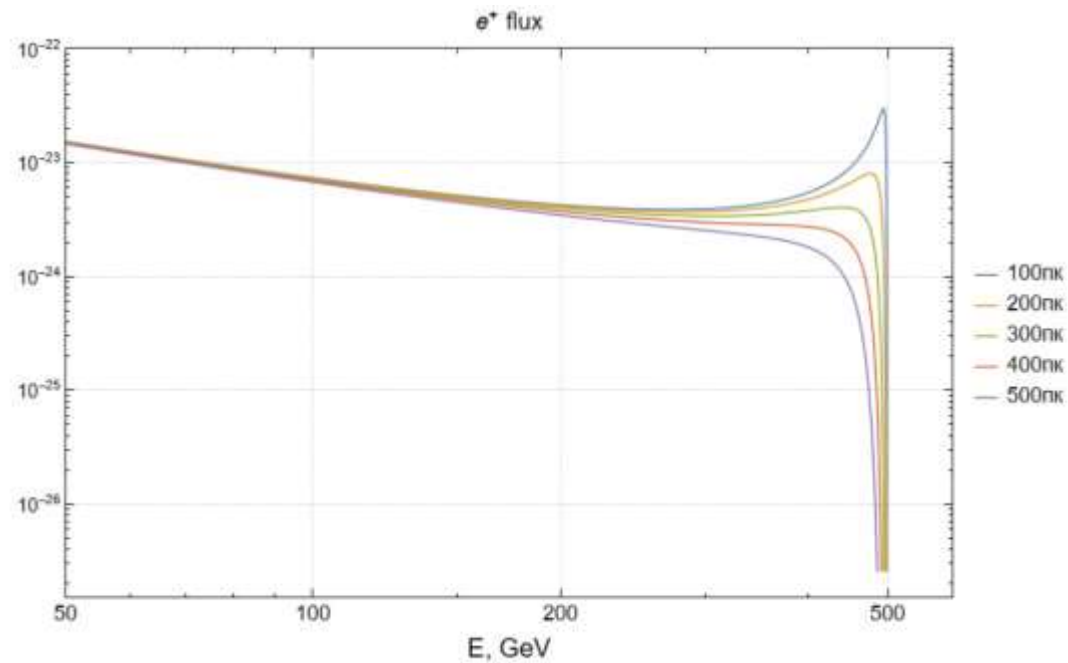
$$\Phi(E) \sim \frac{\eta(M - E)}{E^2 (E^{-0.7} - M^{-0.7})^{i/2}} \sim E^{0.35i-2}$$

i – количество дельта-функций при задании концентрации

Энергетический спектр позитронов для точечного источника, находящегося на заданном расстоянии от наблюдателя

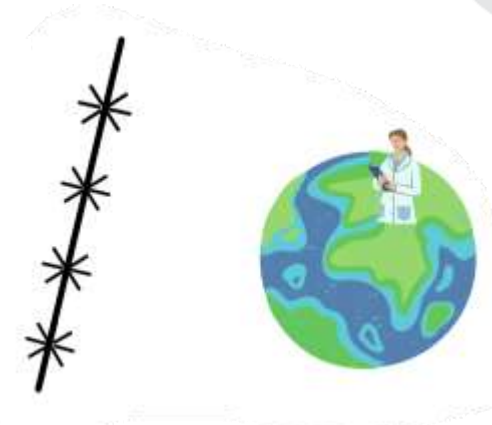


$$\Phi(E) \sim \frac{\eta(M - E)}{E^2 (E^{-0.7} - M^{-0.7})^{3/2}}$$



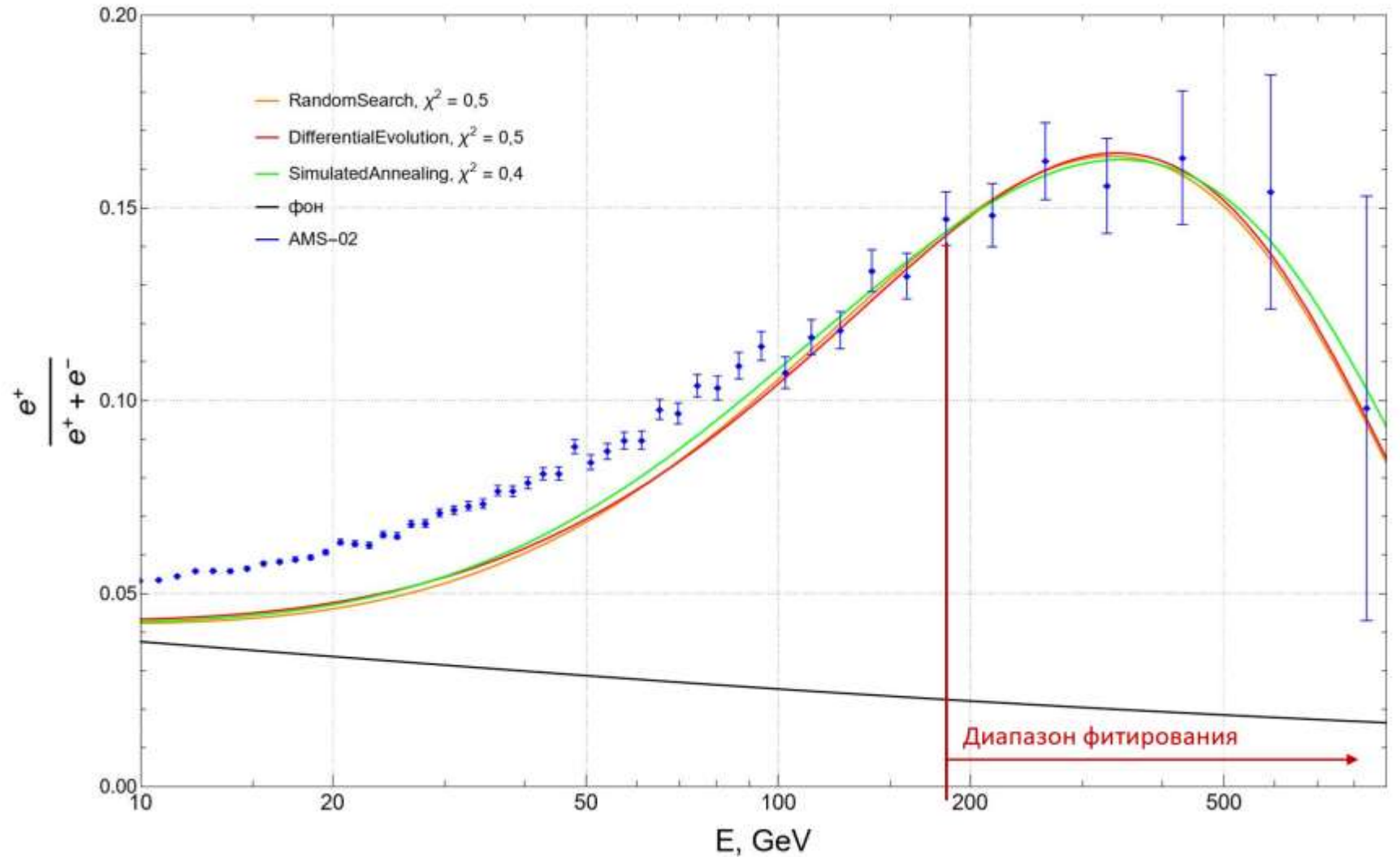
**Энергетический спектр
позитронов для
прямолинейного
распределения источников
на заданном расстоянии от
наблюдателя**

$$\Phi(E) \sim \frac{\eta(M - E)}{E^2 (E^{-0.7} - M^{-0.7})}$$

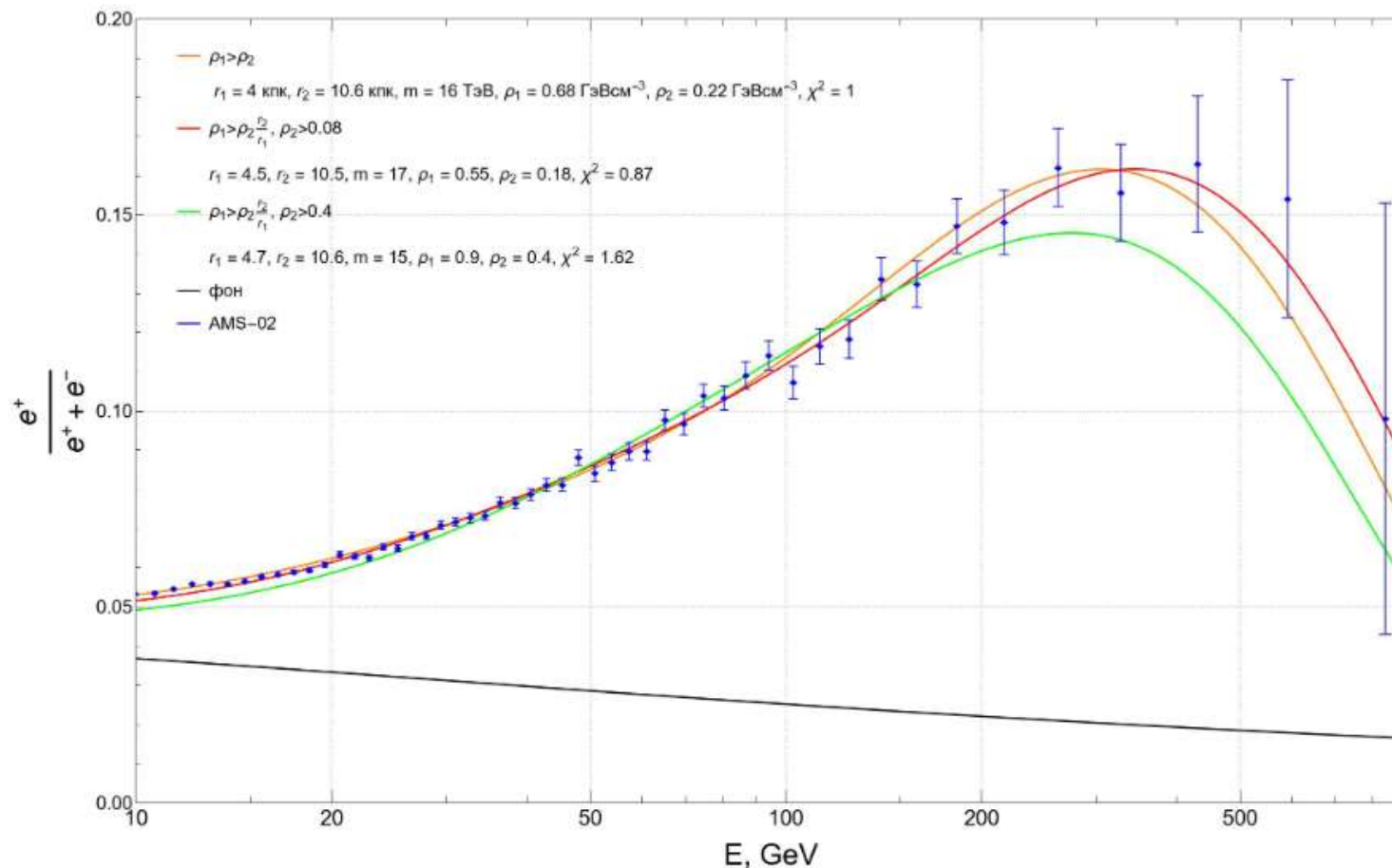


Анализ методов минимизации

Пространственное распределение



Доля позитронов для двух колец с переменной плотностью (электронная мода)

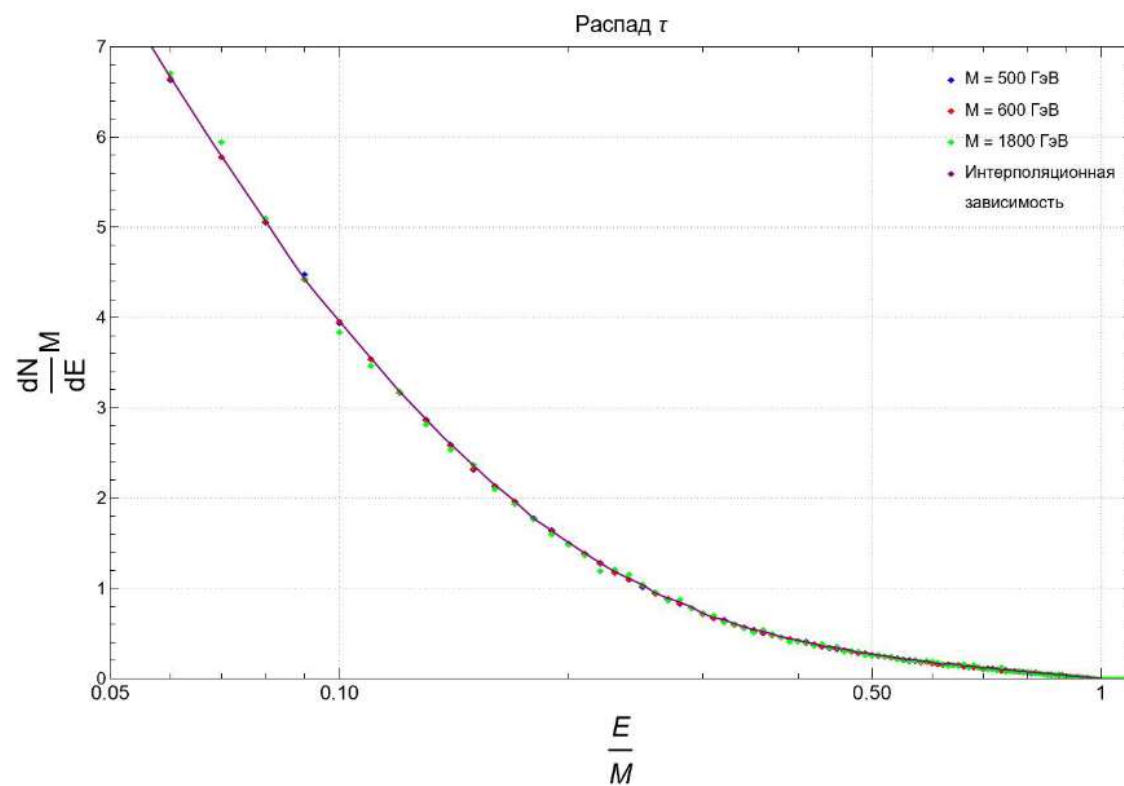
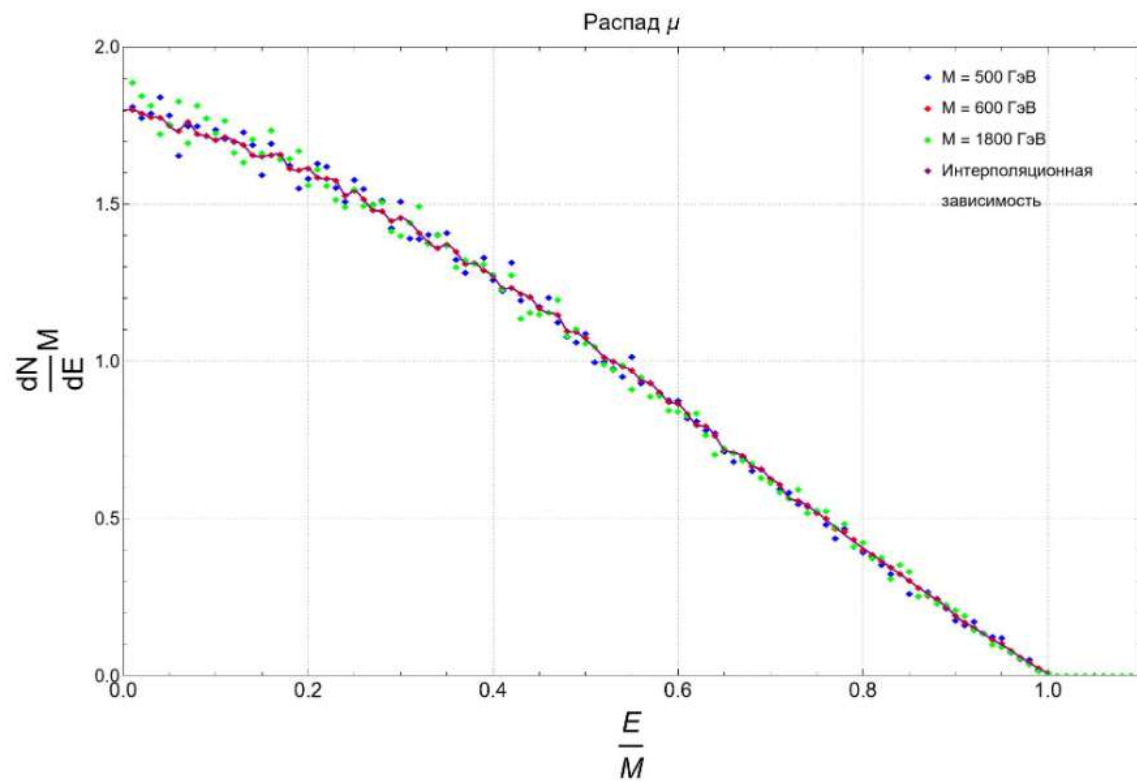


Оптимальные параметры

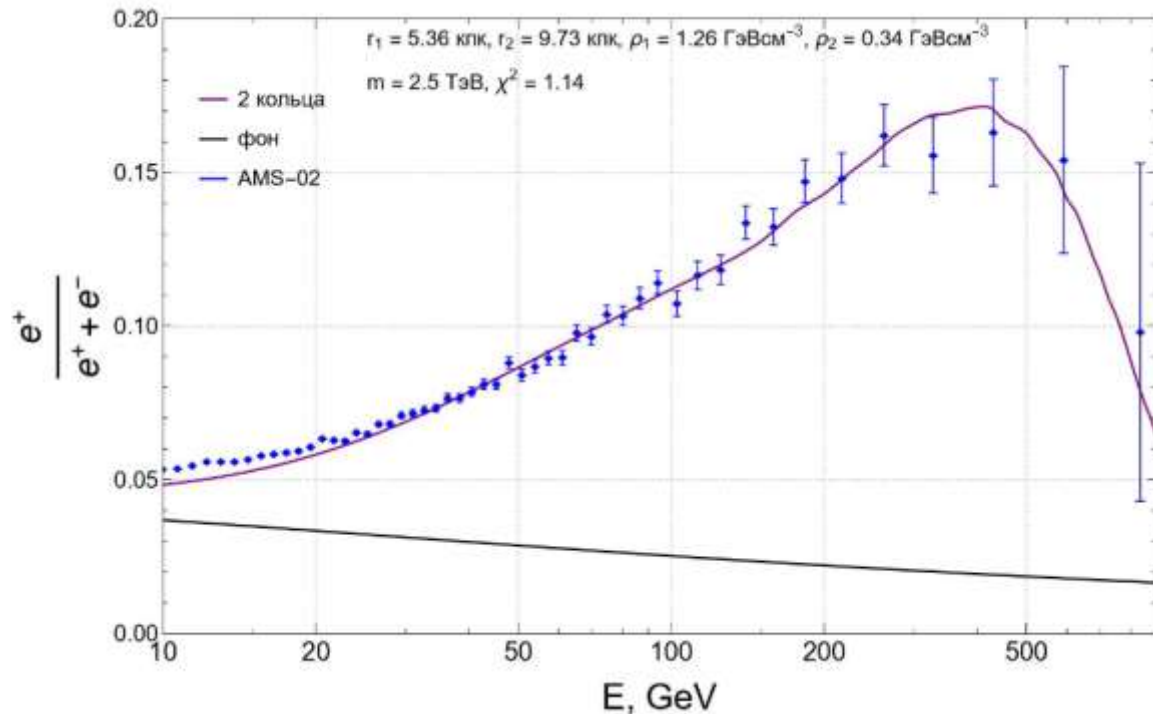
m, ТэВ	r_1 , кпк	r_2 , кпк	$\rho_1, \frac{\text{ГэВ}}{\text{см}^3}$	$\rho_2, \frac{\text{ГэВ}}{\text{см}^3}$	$\langle \sigma v \rangle, \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$	χ^2
17	4.5	10.5	0.6	0.2	$5 \cdot 10^{24}$	0.87

$$\frac{dN_{e^+}(E_0)}{dE} = \delta(E_0 - M)$$

Спектры от распада мюона и тау-лептона



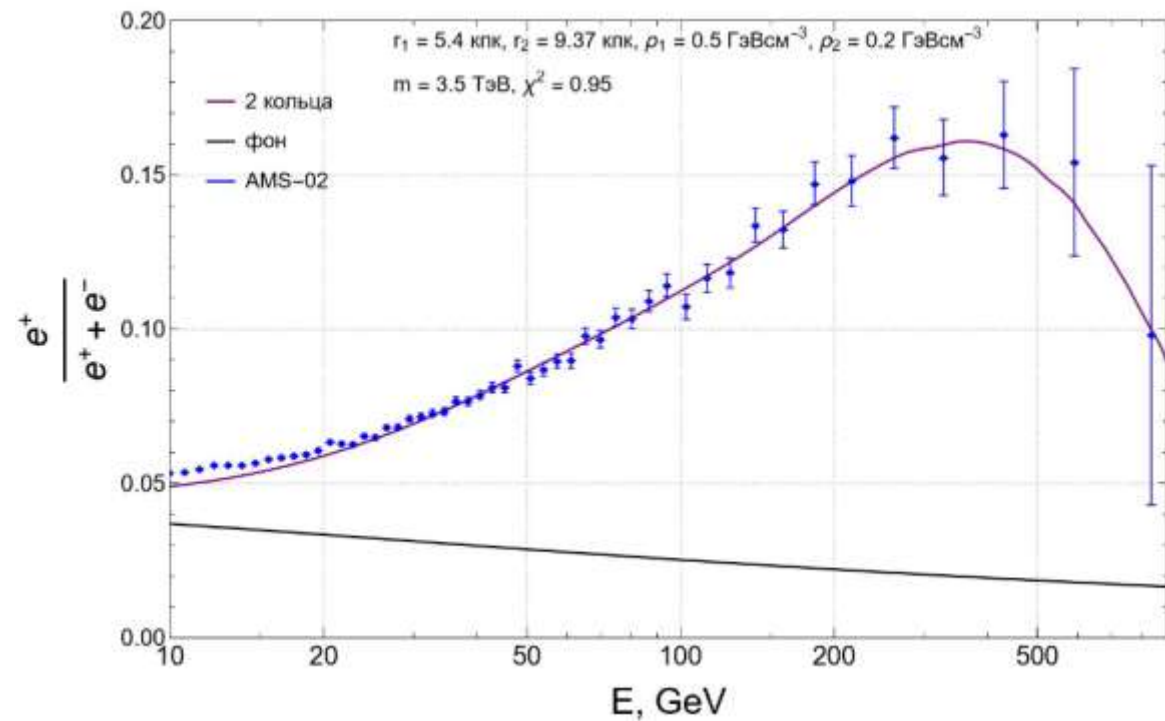
Доля позитронов для мюонной и тау-лептонной моды аннигиляции частиц скрытой массы



Оптимальные параметры						
m, ТэВ	r ₁ , кпк	r ₂ , кпк	ρ ₁ , $\frac{\text{ГэВ}}{\text{см}^3}$	ρ ₂ , $\frac{\text{ГэВ}}{\text{см}^3}$	$\langle \sigma v \rangle$, $\frac{\text{см}^3}{\text{с}}$	χ ²
2.5	5.4	9.7	1.3	0.3	$6.8 \cdot 10^{21}$	1.14

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} \approx \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{2.2}$$

Мюонный канал

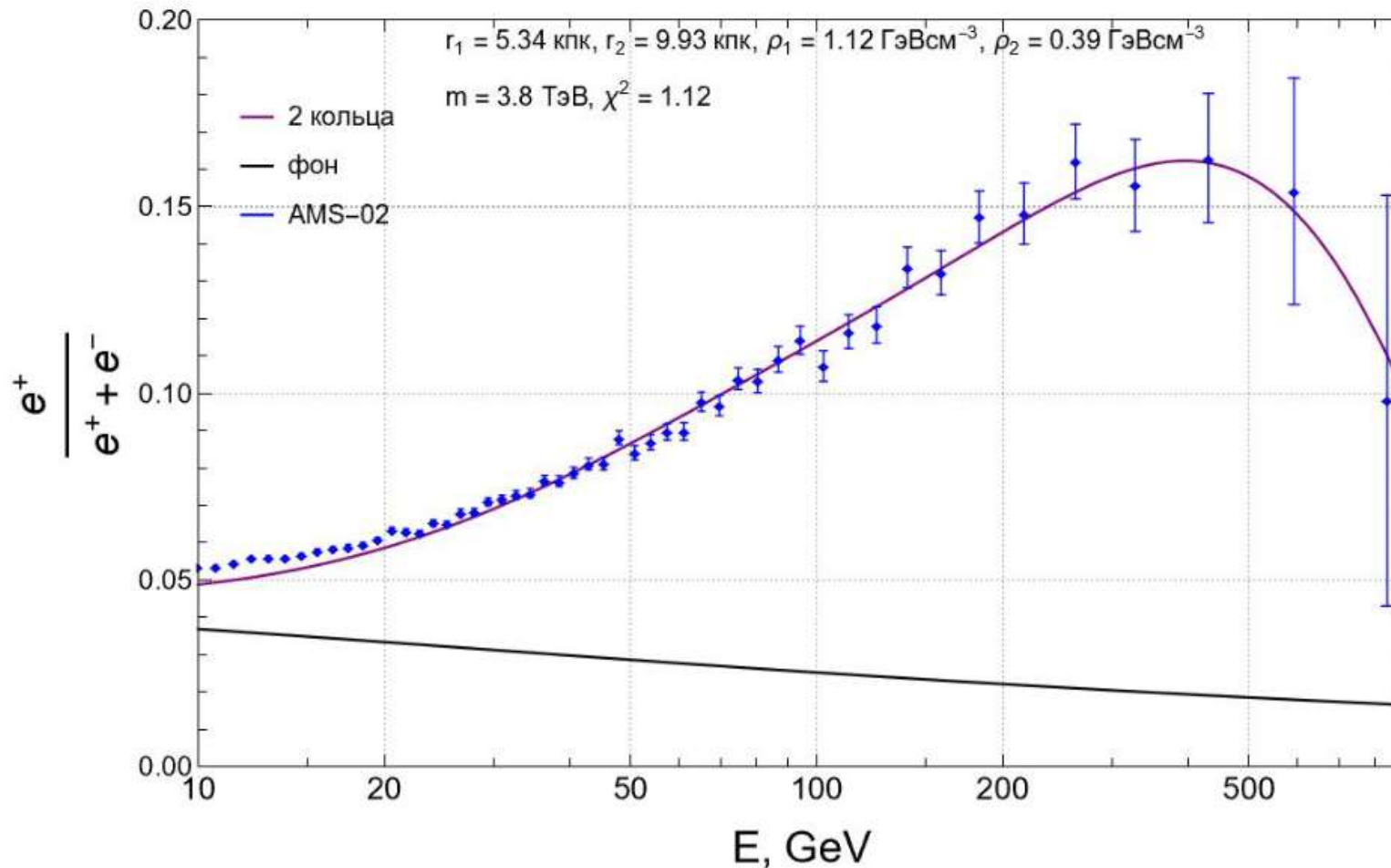


Оптимальные параметры						
m, ТэВ	r ₁ , кпк	r ₂ , кпк	ρ ₁ , $\frac{\text{ГэВ}}{\text{см}^3}$	ρ ₂ , $\frac{\text{ГэВ}}{\text{см}^3}$	$\langle \sigma v \rangle$, $\frac{\text{см}^3}{\text{с}}$	χ ²
3.5	5.4	9.4	0.5	0.2	$6 \cdot 10^{21}$	0.95

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} \approx \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{1.7}$$

Тау-лептонный канал

Доля позитронов для трех каналов аннигиляции частиц скрытой массы



Оптимальные параметры

m, ТэВ	r ₁ , кпк	r ₂ , кпк	ρ ₁ , $\frac{\text{ГэВ}}{\text{см}^3}$	ρ ₂ , $\frac{\text{ГэВ}}{\text{см}^3}$	$\langle \sigma v \rangle$, $\frac{\text{см}^3}{\text{с}}$	χ ²
3.8	5.3	10	1.12	0.4	$3 \cdot 10^{22}$	1.12

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} \approx \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{1.7}$$

В работе изучалось влияние пространственного распределения скрытой массы на форму спектра позитронов в КЛ, а именно:

- были получены **потоки** позитронов для нескольких **простейших распределений** DM в Галактике при **фиксированных параметрах**
- проведен **анализ методов минимизации** функции NMinimize математического пакета Wolfram Mathematica
- получены наилучшие **параметры для описания позитронной аномалии** в пределах модели распределения скрытой массы, собранной в два бесконечно тонких кольца вокруг центра Галактики

Задание концентрации

Точечный источник

$$n(\vec{r}) = \delta(\vec{r} - \vec{r}_0) = \delta(x - x_0)\delta(y - y_0)\delta(z - z_0)$$

Источник, распределенный вдоль прямой

$$n(\vec{r}) = \delta(x - x_0)\delta(y - y_0)$$

Источник, распределенный на плоскости

$$n(\vec{r}) = \delta(x - x_0)$$

Источник с равномерным объемным распределением

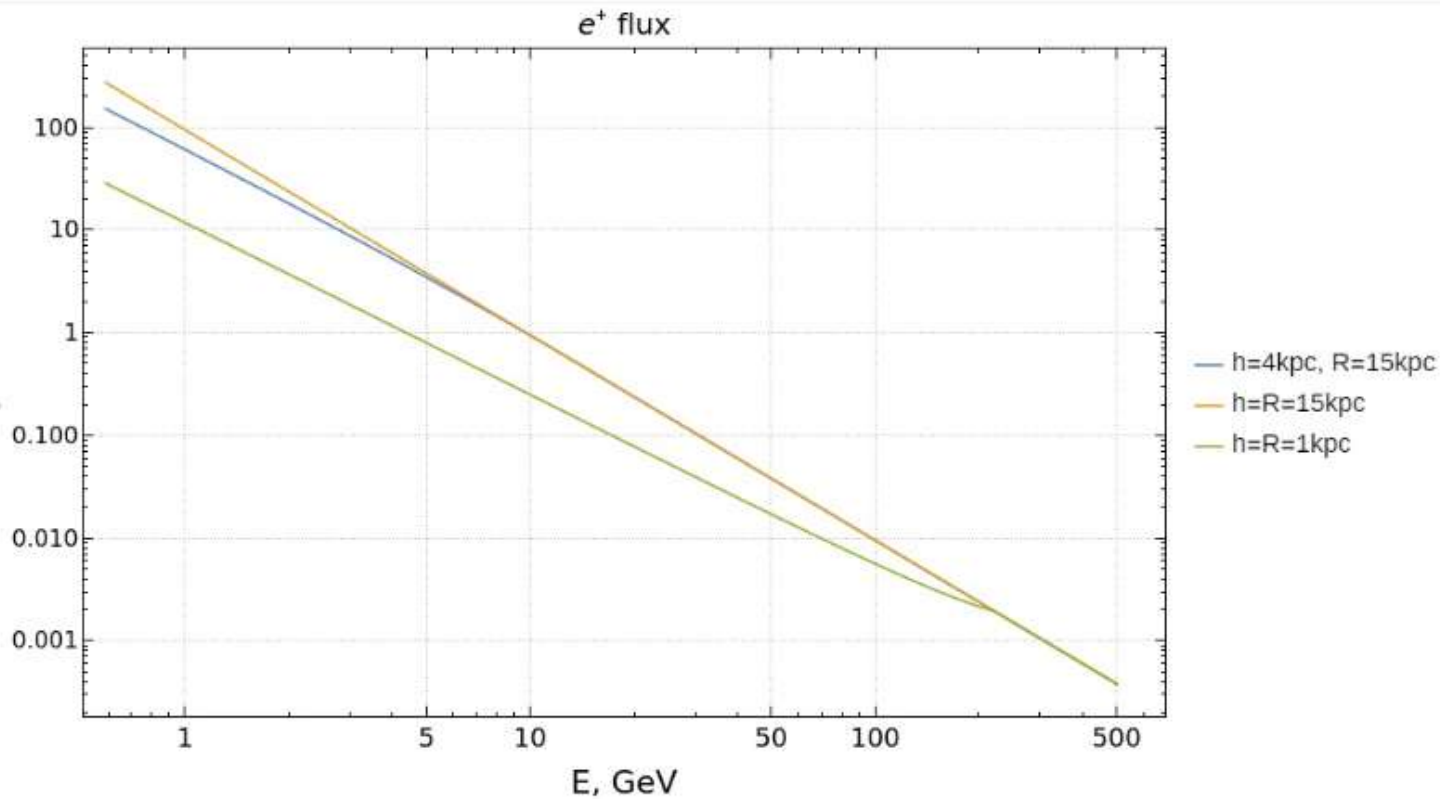
$$n(\vec{r}) = 1$$

Параметрическое задание колец

$$\begin{cases} x = a \cos t + r_{\odot} \\ y = a \sin t \\ z = 0 \end{cases} \quad t \in [0; 2\pi], \quad (4.1)$$

здесь a — радиус кольца, $r_{\odot} = 8.5$ кпк — положение Солнца относительно центра Галактики.

Непрерывное распределение источников в магнитном гало



$$\Phi(E) = \frac{c}{4\pi} n_{\text{loc}}^2 \langle \sigma v \rangle \frac{1}{\beta E^2} \int_E^M \frac{dN}{dE_0} Q(\lambda(E_0, E)) dE_0$$

$$Q = 1 - \frac{(\lambda - h)^2(2\lambda + 4)}{2\lambda^3} \eta(\lambda - h) - \frac{2h(\lambda^2 - R^2)}{3\lambda^3} \eta(\lambda - R)$$

Магнитное гало



Гало скрытой массы

Фоновые потоки

$$\Phi_{e^-}^{\text{bkg}}(E) = \left(\frac{82.0\epsilon^{-0.28}}{1 + 0.224\epsilon^{2.93}} \right) \text{GeV}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$$

$$\Phi_{e^+}^{\text{bkg}}(E) = \left(\frac{38.4\epsilon^{-4.78}}{1 + 0.0002\epsilon^{5.63}} + 24.0\epsilon^{-3.41} \right) \text{GeV}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$$