

Косвенные эффекты скрытой массы

Выполнил: Соловьев М.Л.
А19-111

Руководитель: Белоцкий К.М.

Цель работы - разработка модели, объясняющей избытки заряженных частиц в космических лучах без противоречия с данными по фону гамма-излучения за счет пространственного распределения скрытой массы.

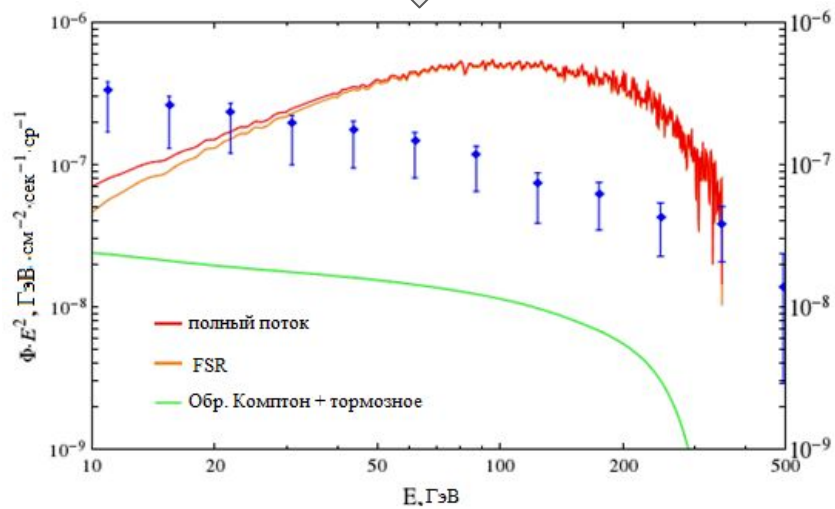
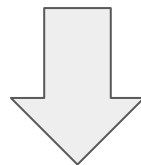
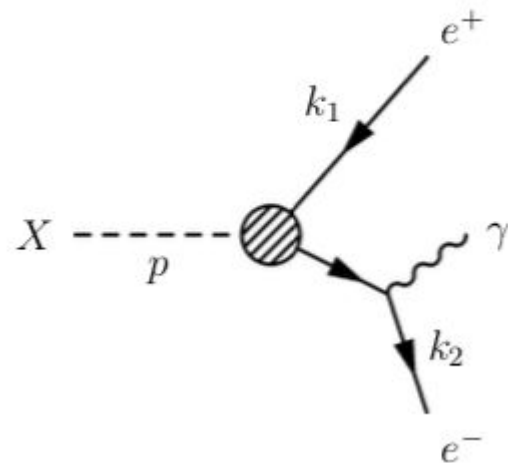
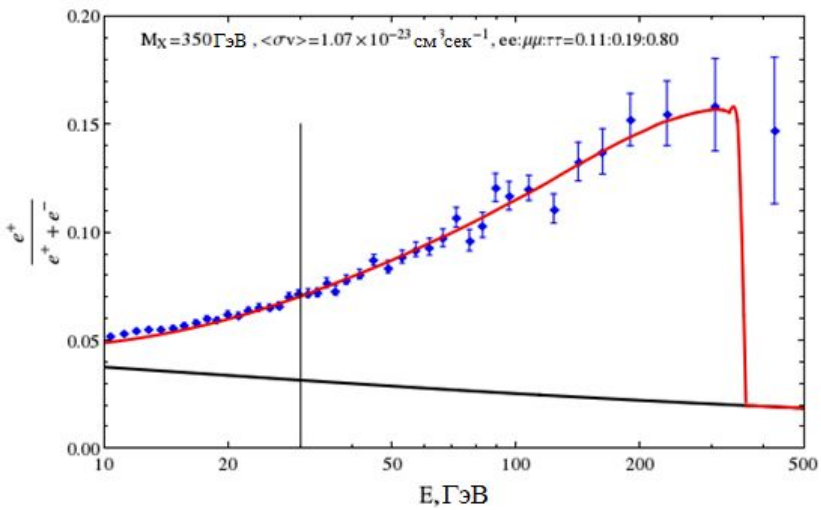
Задачи

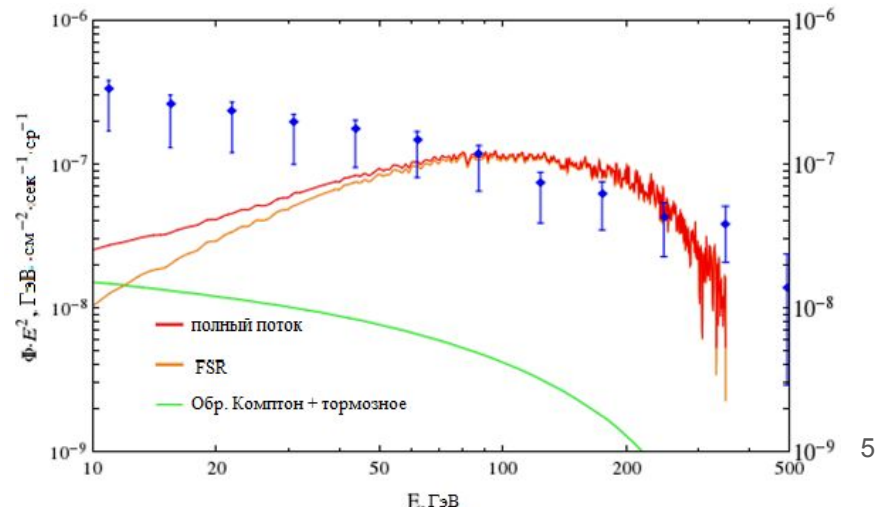
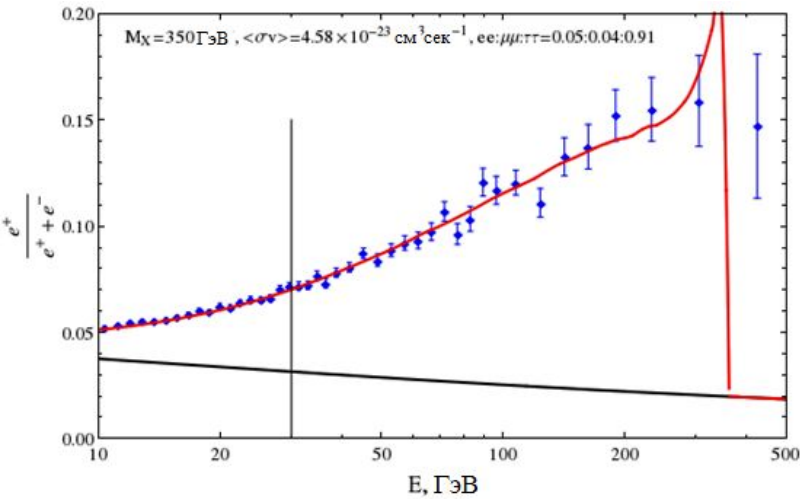
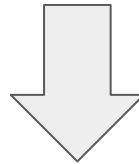
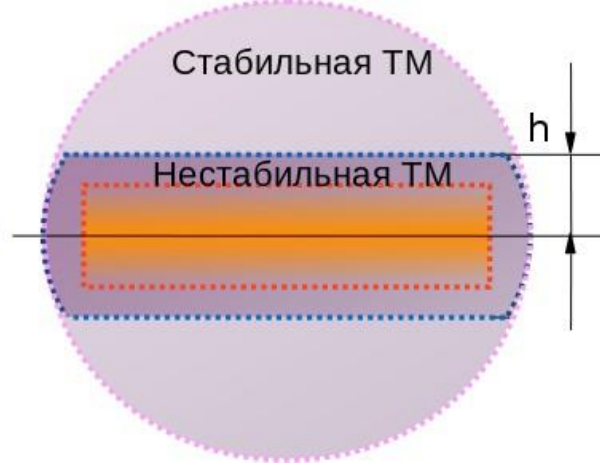
- Поиск наилучшей конфигурации модели скрытой массы для объяснения избытков заряженных частиц в космических лучах
- Разработка метода независимой проверки моделей нестабильной скрытой массы на основе эффектов в гамма-излучении от галактики M31

Положения, выносимые на защиту

- Поставленные на модель темного диска ограничения и предложение модели колец для их обхождения
- Методика независимой проверки модели диска на основе анизотропии вторичного гамма-излучения от M31

Глава 1. Избыток позитронов в космических лучах





Модификации модели

AMS-02

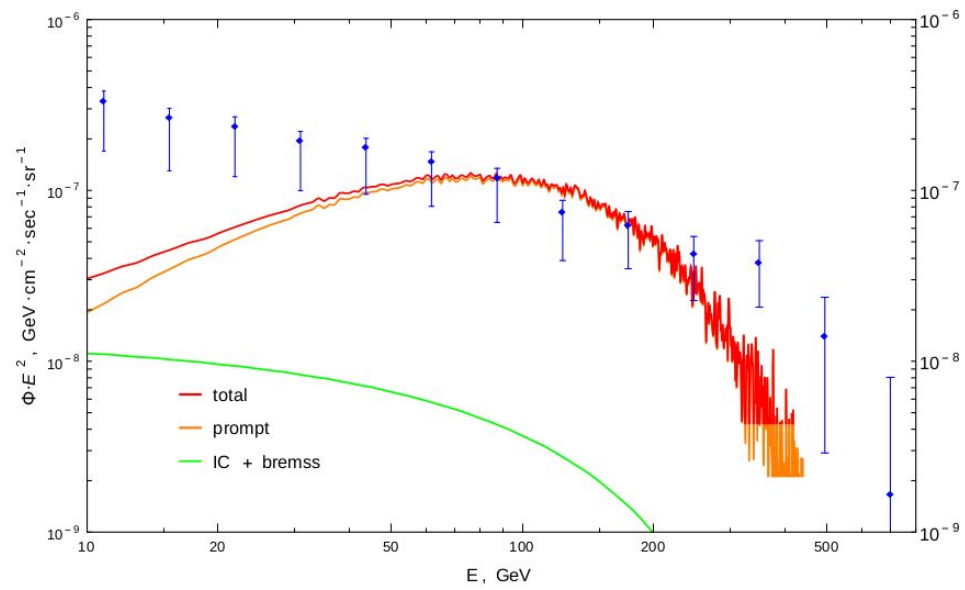
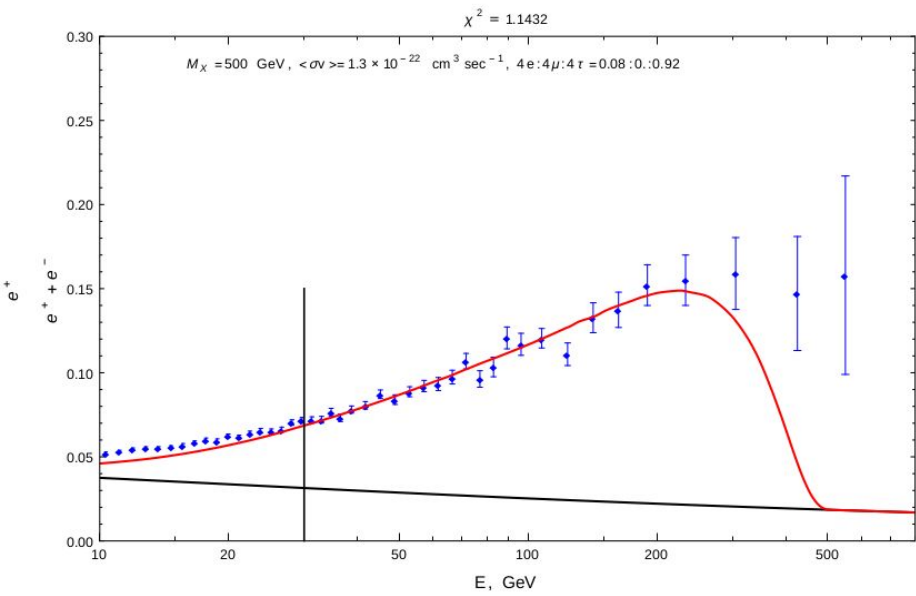
1. Учет гамма-излучения из Галактического центра
2. Модель с каскадной аннигиляцией
3. Модель с кварковым каналом реакции
4. Учет вклада неразрешенных источников в гамма-фон

DAMPE

1. Модель гало + каскад
2. Модель диска
3. Сравнение аннигиляции и распада с учетом ГЦ
4. Модель с кварковым каналом реакции

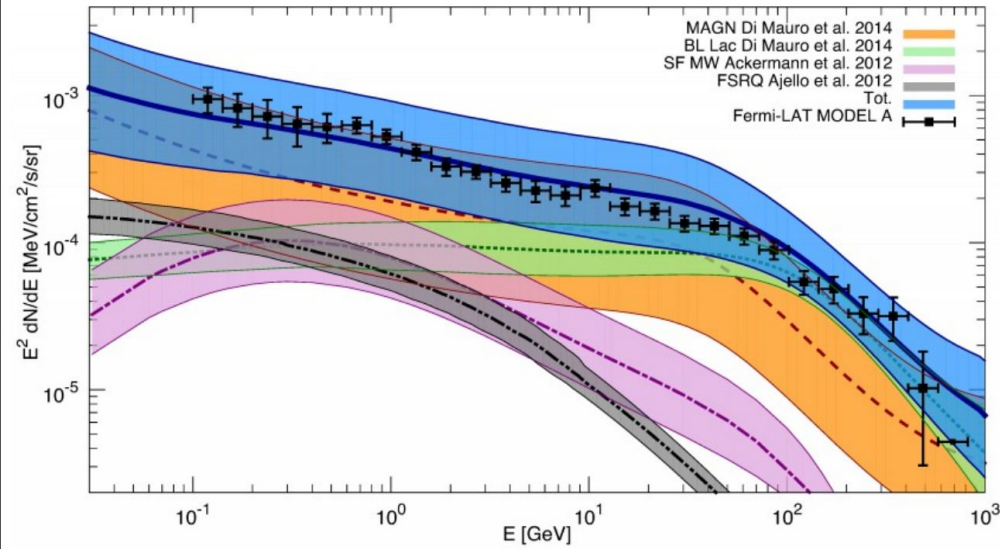
$$\chi^2/N$$

Эксперимент\ модель	Гало	Диск
AMS-02	5	0.8
DAMPE	3.8	2.1

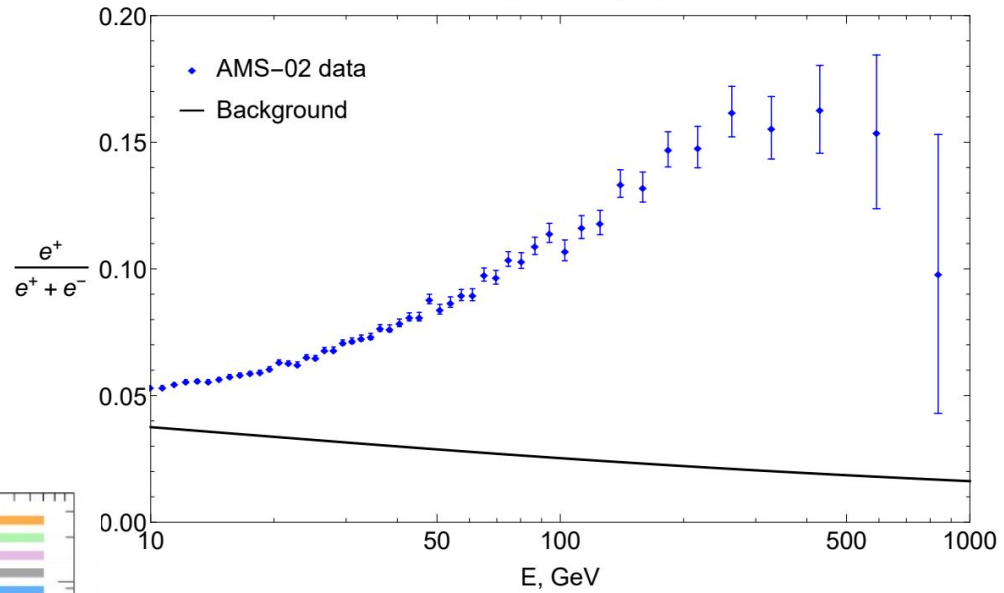


Модель колец

IGRB composition with MW SF model



Positron fraction

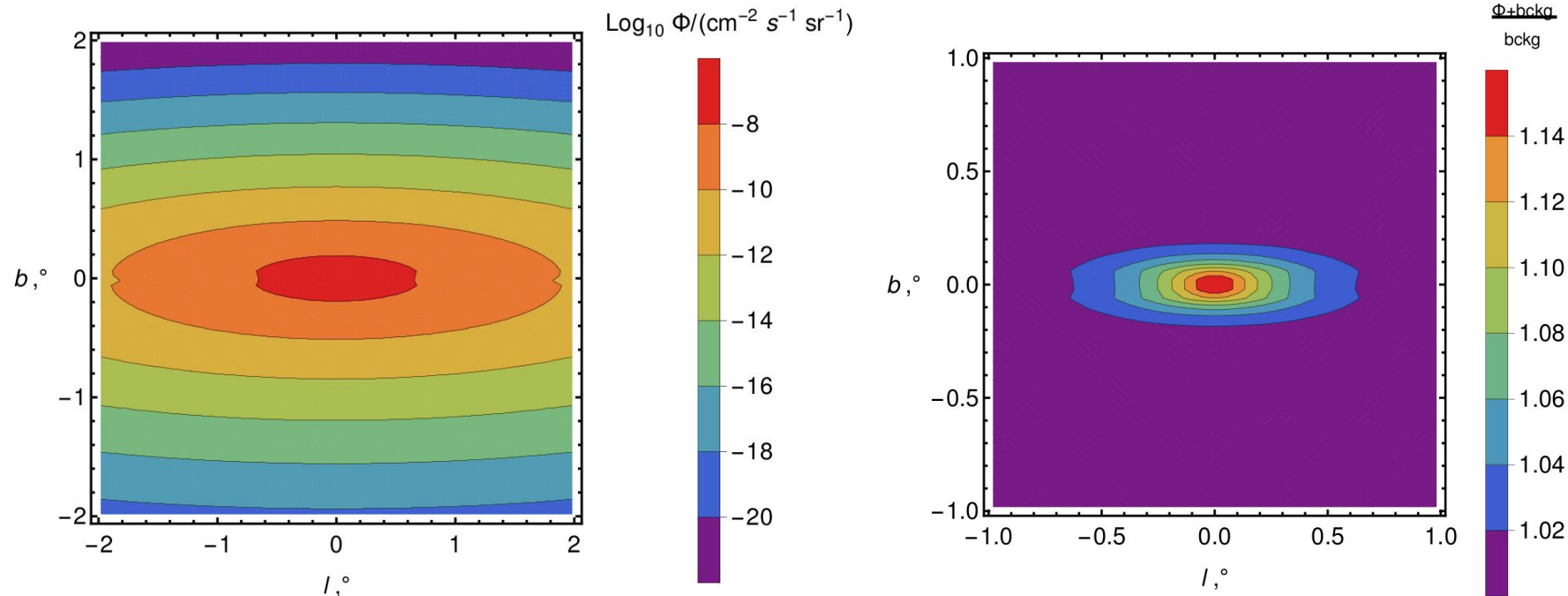


	Гало	Диск	Кольца
До учета	5	1.8	-
С учетом	200	18	3

Глава 2. Возможные наблюдательные эффекты в гамма-излучении от скрытой массы галактики M31

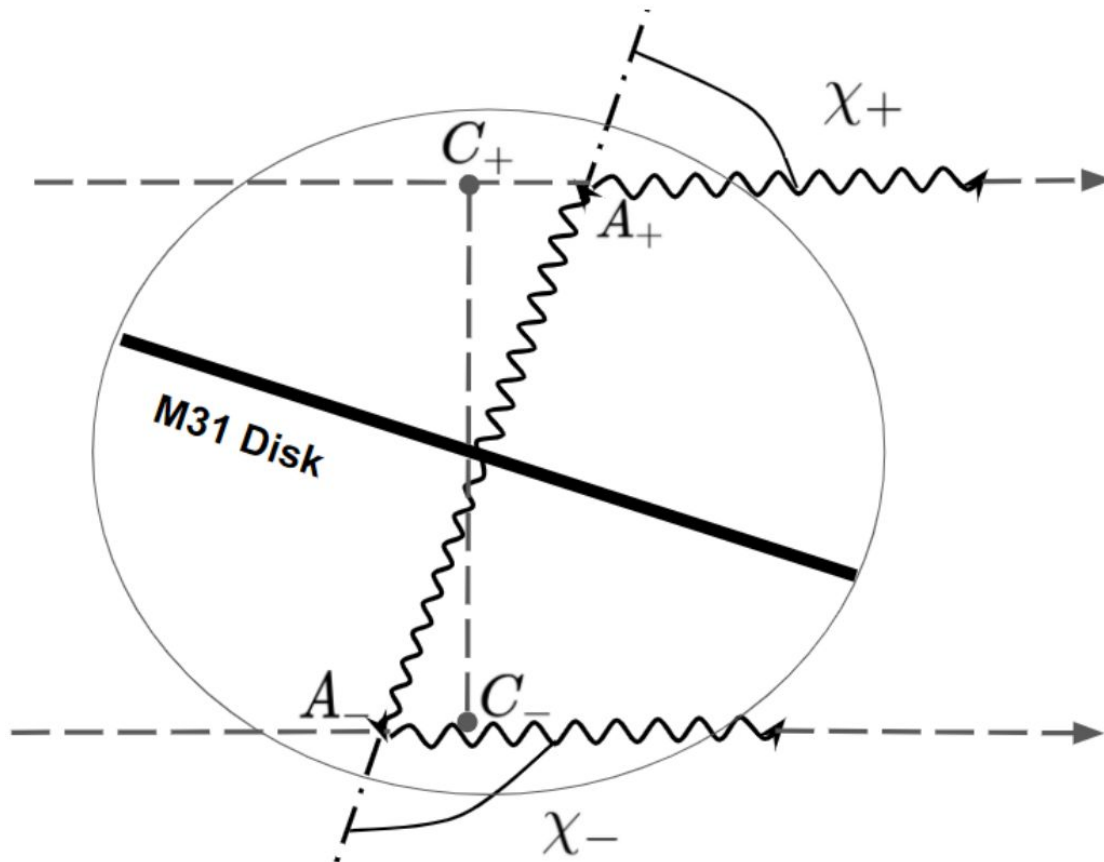
Возможные наблюдательные эффекты в гамма-излучении от скрытой массы галактики M31

Первичное излучение от диска ТМ

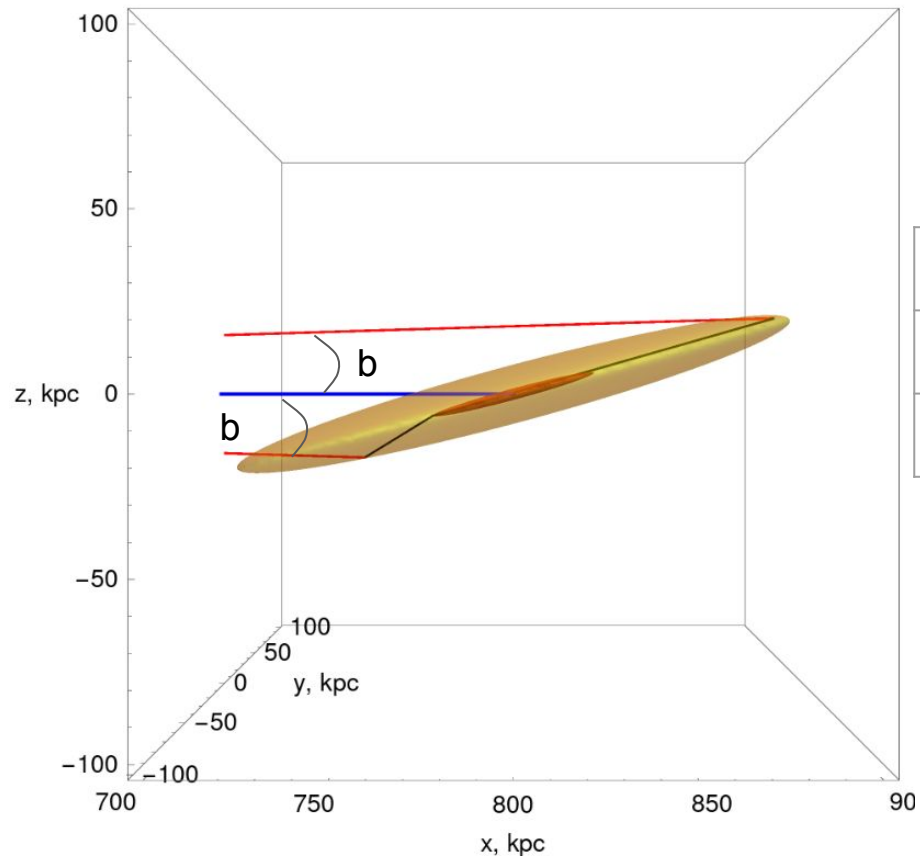


Анизотропия вторичного гамма-излучения

2D-модель



3D -модель



Профиль	$b, ^\circ$	E^+_{\max}/E^-_{\max}	$\Phi(E^+_{\max})/\Phi(E^-_{\max})$
Гало	6	1	1
Диск	1,75	1,13	1,28

Заключение

- Изменение пространственного распределения ТМ - эффективный способ подавления гамма-излучения
- Модель темного диска имеет проблемы с описанием потока заряженных частиц в КЛ при низких энергиях → оптимальными оказываются параметры, не способные описать весь спектр
- Обновление данных по доле позитронов и гамма-излучению сделало модель диска недостаточной для решения противоречия. Возможное решение - модель спиральных рукавов
- Слабый эффект в первичном гамма-излучении от М31 при рассмотренных параметрах модели. Потенциал его усиления при других параметрах
- Отсутствие анизотропии во вторичном гамма-излучении от М31 на высоких энергиях в случае гало.
- Анизотропия в максимальной энергии и соответствующих потоках от М31 в случае диска даже при высоких энергиях.

Запасные слайды

АМС

$$\rho_{\text{NFW}}(r) = \frac{\rho_0}{\frac{r}{R_s} \left(1 + \frac{r}{R_s}\right)^2}$$

$$\rho_{\text{NFW}}^{\text{Disk}}(R, z) = \begin{cases} \rho_{\text{NFW}}(r), & z \leq z_c; \\ 0, & z > z_c. \end{cases}$$

$$\rho(R, z) = \rho_0 e^{-\frac{R}{R_c}} e^{-\frac{|z|}{z_c}},$$

$$\chi_{\text{tot}}^2 = \frac{1}{N_{\text{d.o.f}}} (\chi_{\text{posi}}^2 + \chi_{\text{IGRB}}^2 + \chi_{\text{extra}}^2), \quad \chi_{\text{posi}}^2 = \sum_{\text{datapoints}} \frac{\Delta\Phi_e^2}{\sigma_e^2},$$

$$\chi_{\text{IGRB}}^2 = \sum_{\text{datapoints}} \frac{\Delta\Phi_\gamma^2}{\sigma_\gamma^2} H_\theta (\Delta\Phi_\gamma) \quad \chi_{\text{GC}}^2 = \sum_{\text{datapoints}} \frac{\Delta\Phi_{\gamma c}^2}{\sigma_{\gamma c}^2} H_\theta (\Delta\Phi_{\gamma c})$$

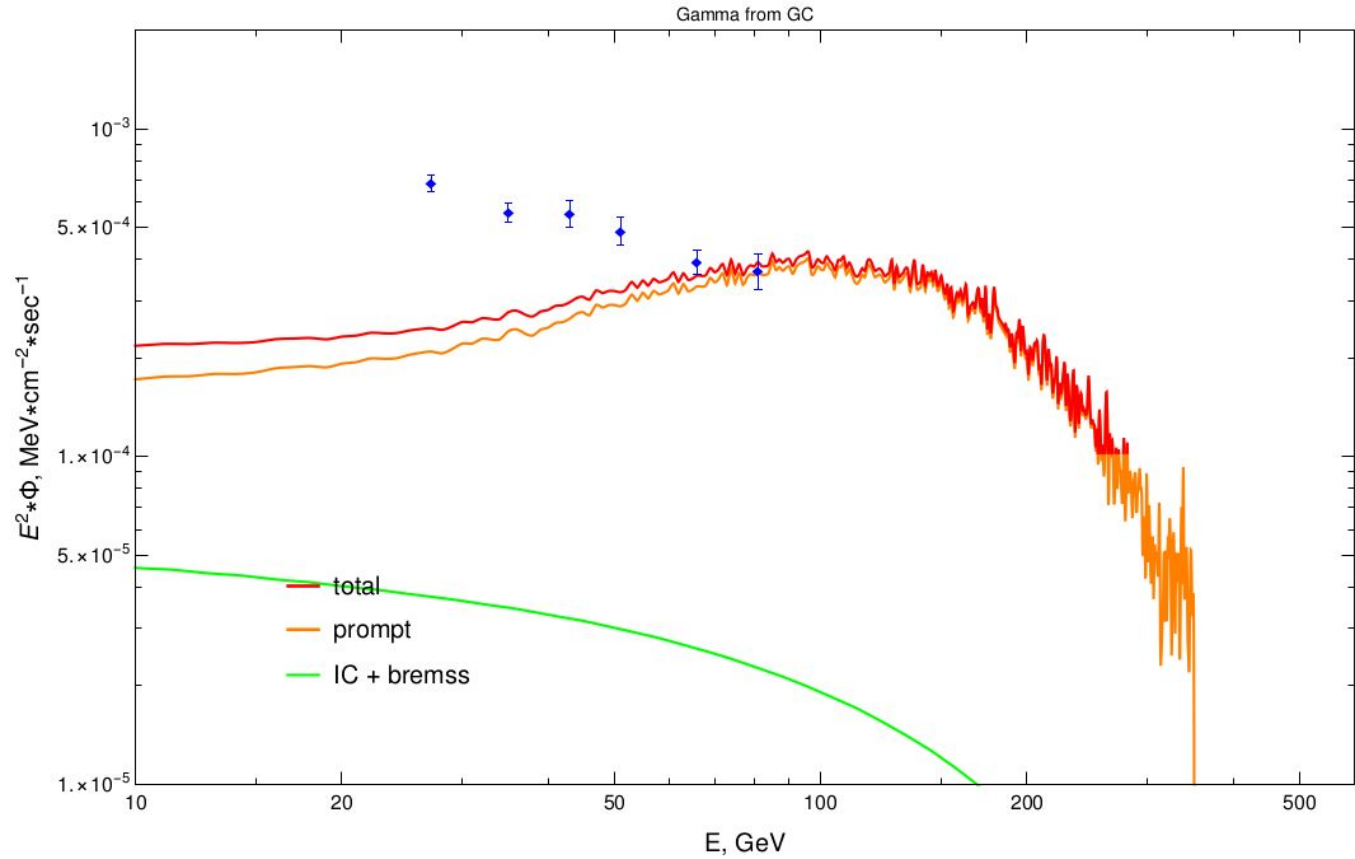
$$\chi_p^2 = \begin{cases} \sum \frac{\Delta\Phi_p^2}{\sigma_p^2}, \text{ описание данных} \\ \sum \frac{\Delta\Phi_p^2}{\sigma_p^2} H_\theta (\Delta\Phi_p), \text{ непревышение данных} \end{cases}$$

$$\Phi_e^{\text{DM}} = k \sum_{\text{channels}} Br_{\text{channel}} \frac{dN}{dE}^{\text{channel}},$$

$$\Phi_\gamma^{\text{sec}} = k \sum_{\text{channels}} Br_{\text{channel}} \frac{dN}{dE}^{\text{channel}\gamma},$$

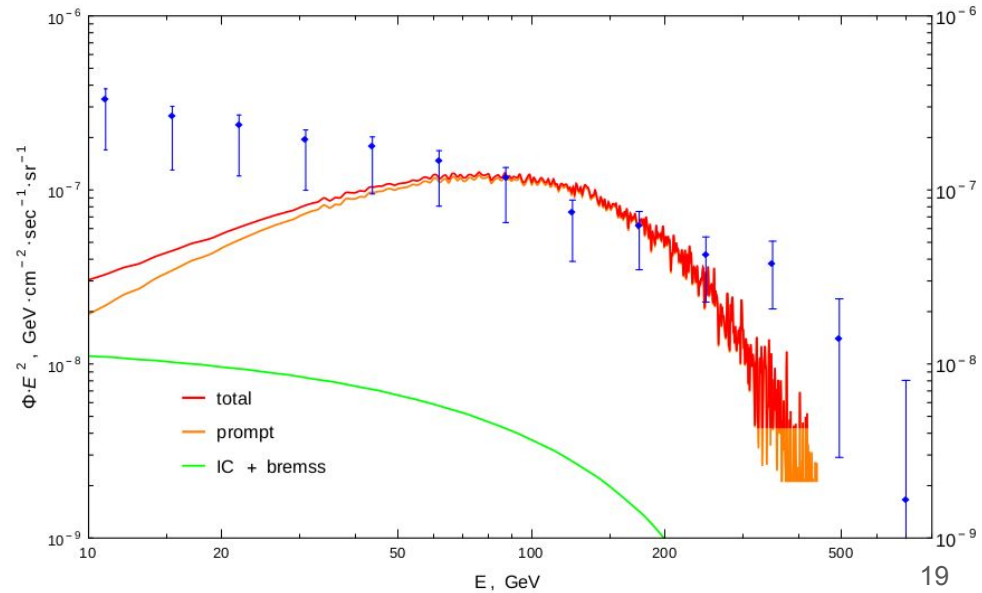
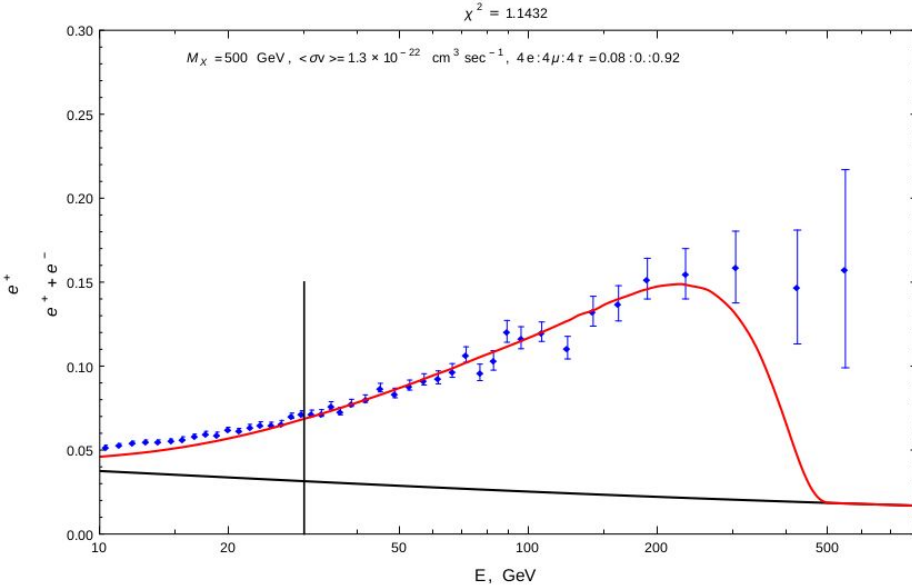
$$\Phi_\gamma^{\text{prompt}} = \sum_{\text{channels}} Br_{\text{channel}} \frac{dN}{dE}^{\text{channel}\gamma p} \times \frac{\langle \sigma v \rangle}{4} \frac{1}{\Delta\Omega} \int_0^{100 \text{ kpc}} \int_{\Delta\Omega} \frac{1}{4\pi r^2} \left(\frac{\rho}{M_X} \right)^2 r^2 \cos(\theta) dr d\Omega,$$

1) Галактический Центр

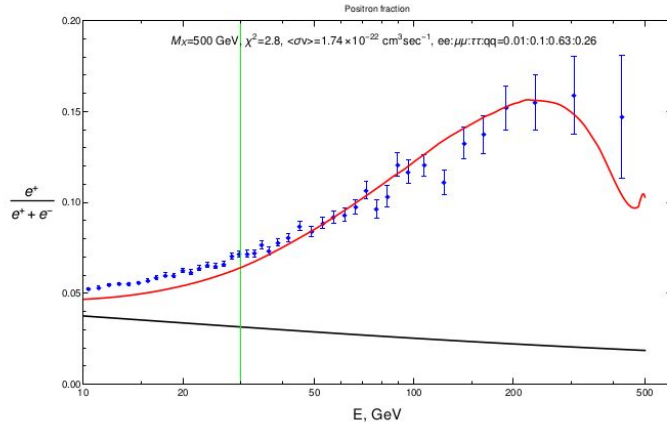


2) Каскадная аннигиляция

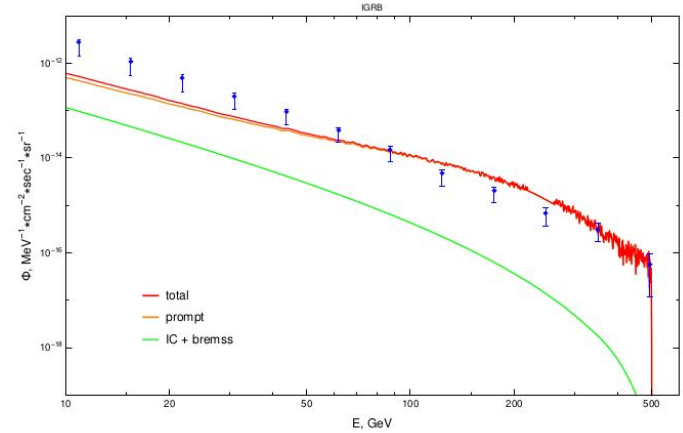
$$X\bar{X} \rightarrow a\bar{a} \rightarrow 2(f\bar{f})$$



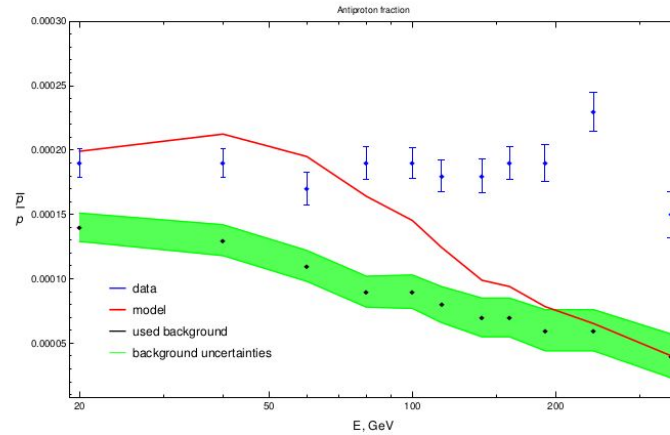
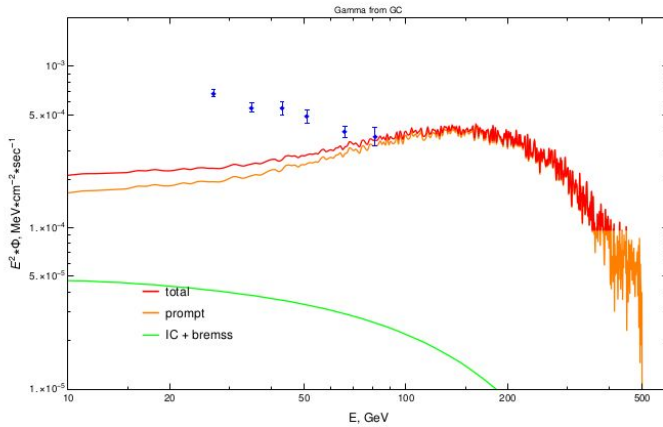
3) Кварковый канал реакции



(a)



(б)



Итоги модификаций

Исходная модель - 1.4



После обновления данных и ГЦ - 1.8



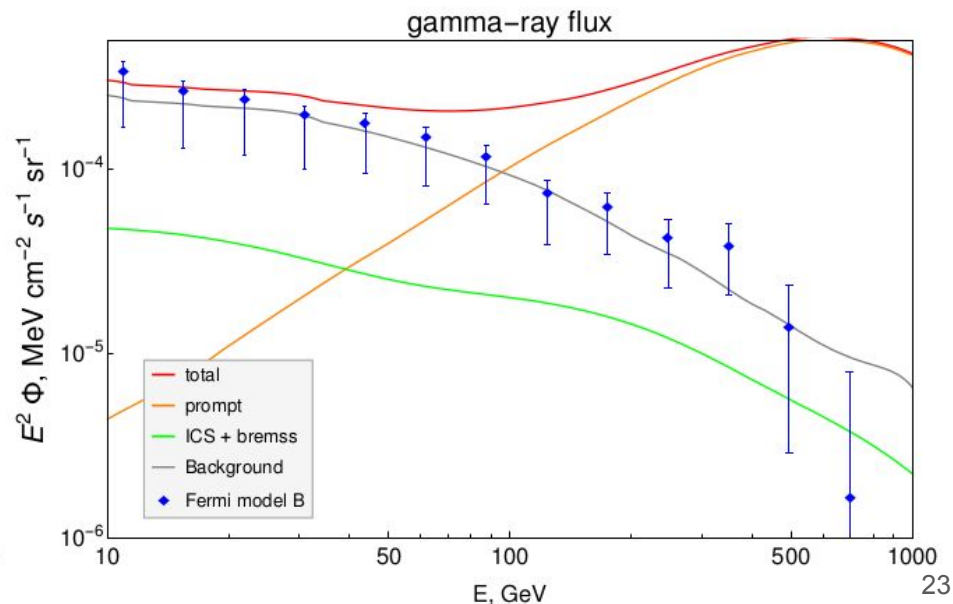
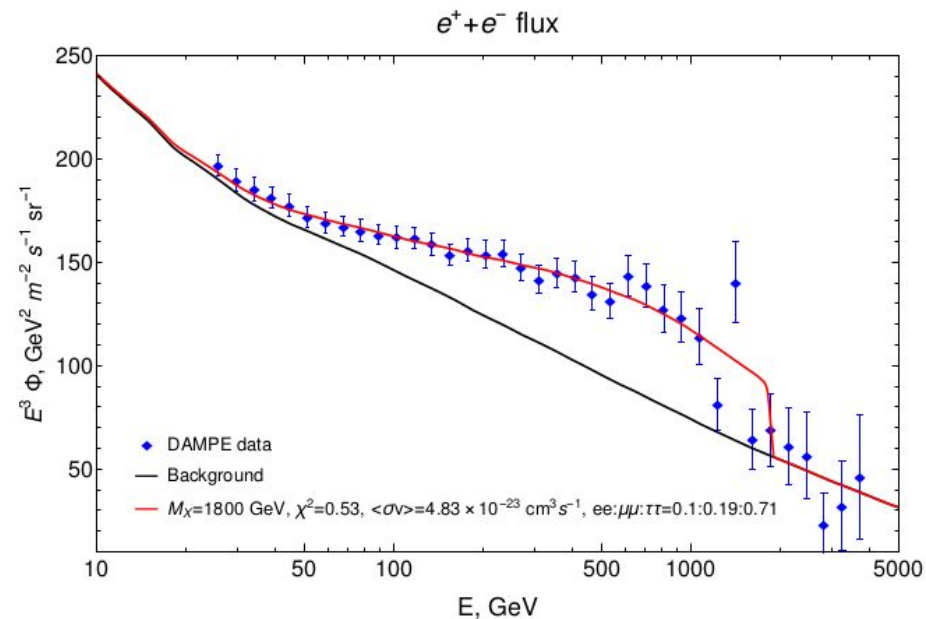
	$2e + 2\mu + 2\tau$	$2e + 2\mu + 2\tau + 2q$	$4e + 4\mu + 4\tau$	$4e + 4\mu + 4\tau + 4q$
χ^2/N_{dof}	1.8	1.3 (1.7)	1.1	0.8 (1)

Таблица 1.1 – Значения χ^2 для разных каналов реакции для случаев лучшего описания данных. Значение в скобках соответствует значению N_{dof} без учета точек данных по антипротонам.

DAMPE

Применение модели «темного диска» к широкому избытку электронов и позитронов в данных DAMPE

1) Гало



1 каскад

$$\frac{dN_e}{dE_e} = 4 \frac{m_a}{E_a p_e^*} \Big|_{E^-}^{E^+}$$

2 каскада

$$\frac{dN_e}{dE_e} = 4 \int_{2m_e}^{M_X/2} \frac{dw_{b \rightarrow aa}}{dE_a} \frac{dw_{a \rightarrow e^+e^-}}{dE_e} dE_a$$

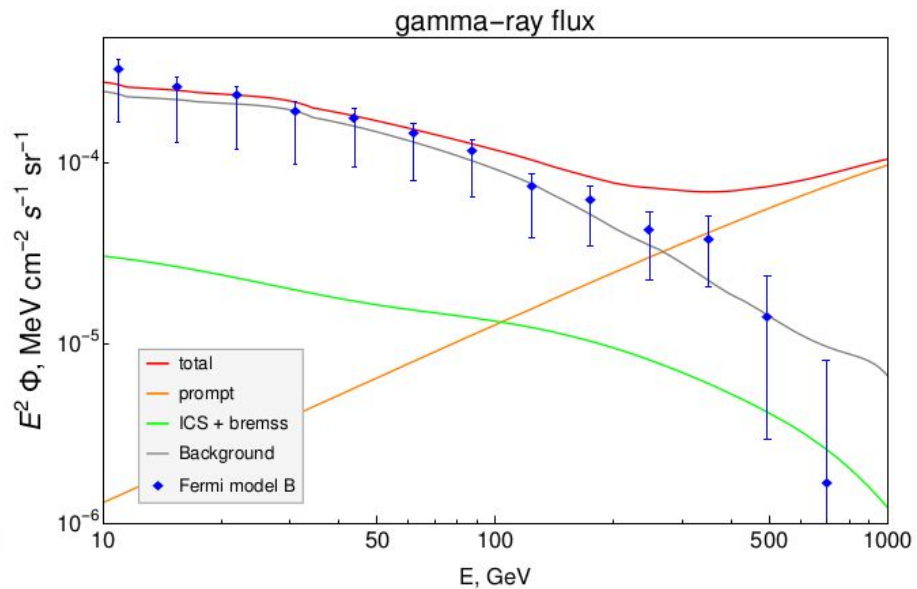
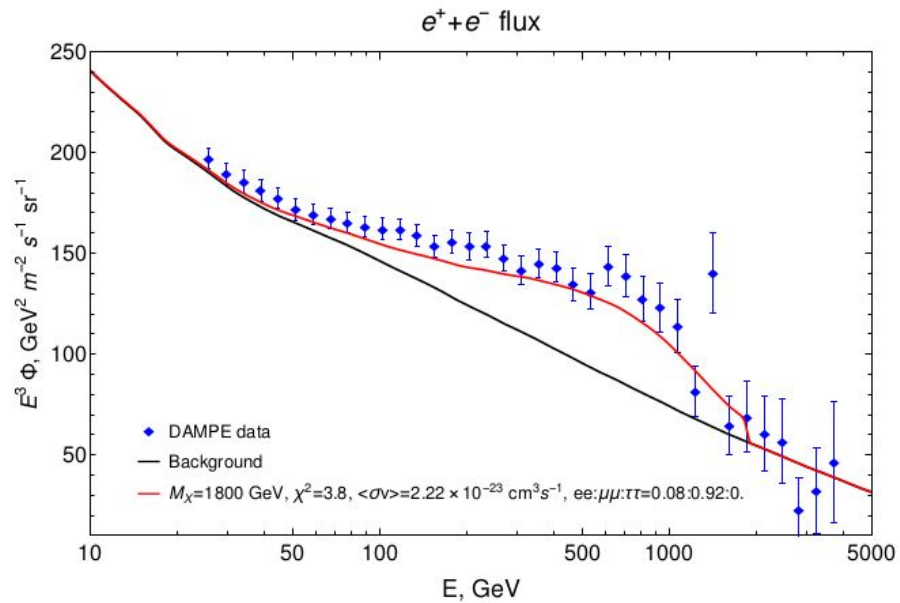
$$\frac{dw_{b \rightarrow aa}}{dE_a} = \frac{2}{M_x} \Big|_0^{\frac{M_X}{2}},$$

$$\frac{dw_{a \rightarrow e^+e^-}}{dE_e} = 2 \frac{m_a}{E_a p_e^*} \Big|_{E^-}^{E^+}$$

$$\frac{dN_\gamma}{dE_\gamma} = \int_E^{M_X} f_\gamma(E, E_0) \frac{dN_e}{dE_e}(E_0) dE_0,$$

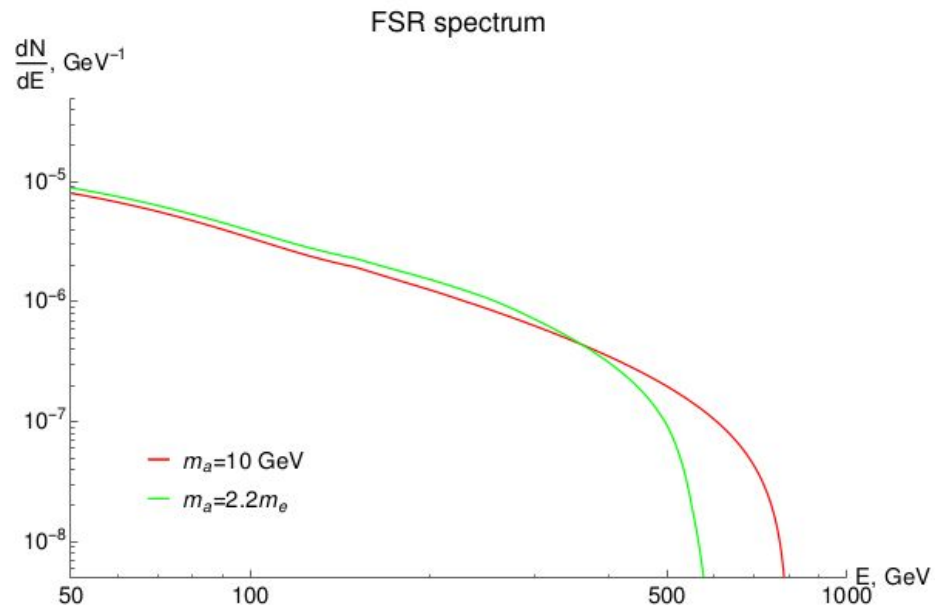
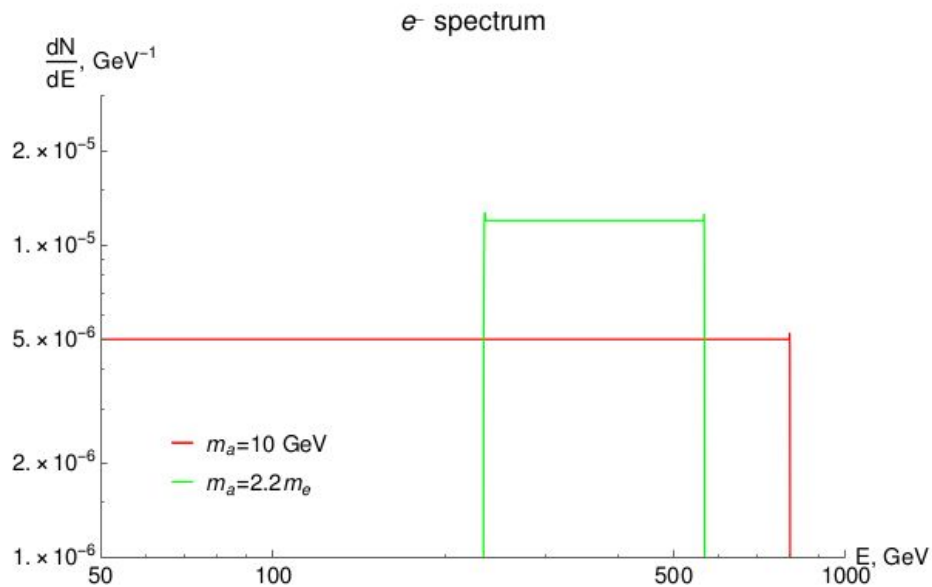
$$f_\gamma(E, E_0) = \frac{\alpha}{\pi E} \left(1 + \left(1 - \frac{E}{E_0} \right)^2 \right) \left(\ln \left[\left(\frac{2E_0}{m_e} \right)^2 \left(1 - \frac{E}{E_0} \right) \right] - 1 \right)$$

Гало - комб

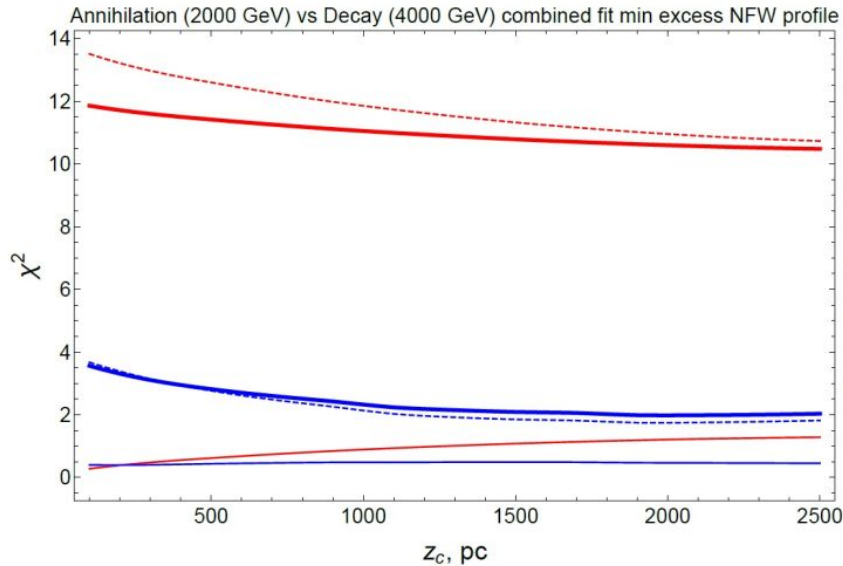
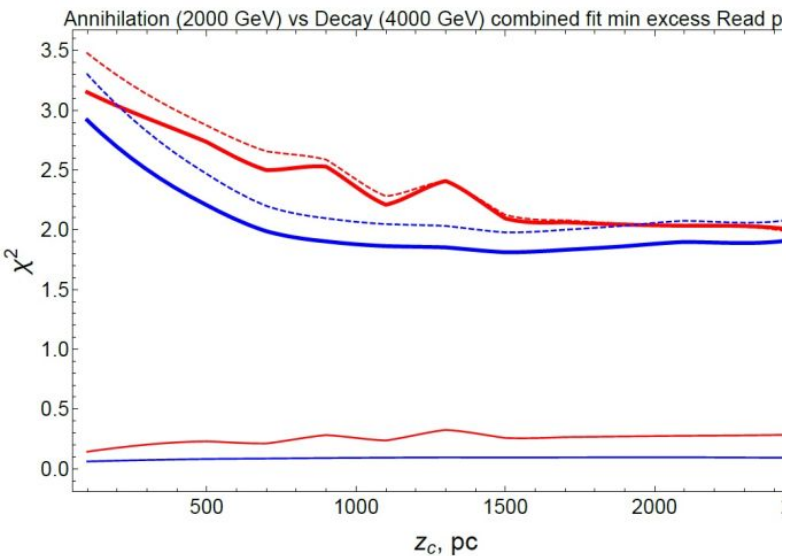


2) Гало + каскад

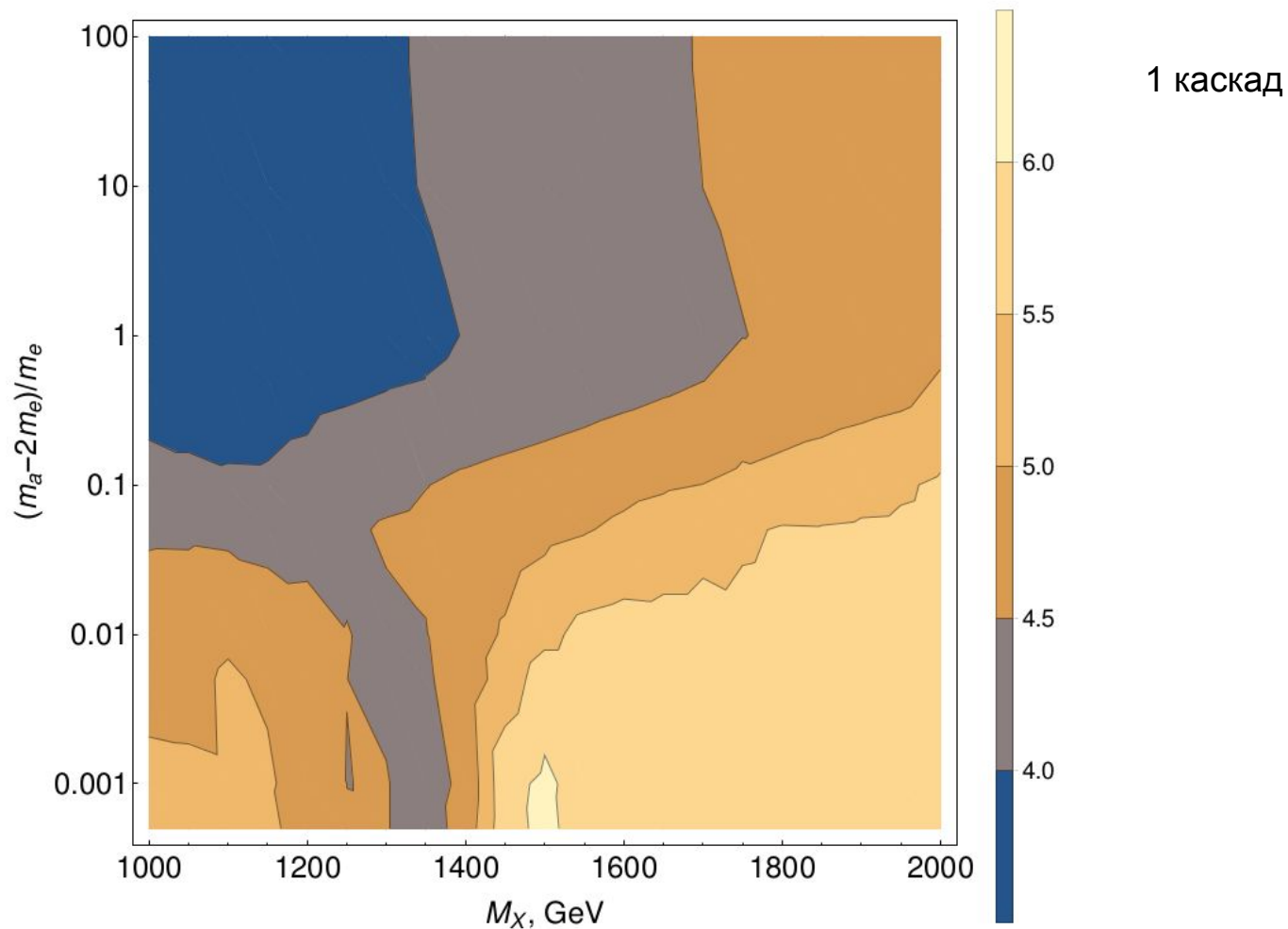
- $X\bar{X} \rightarrow a\bar{a} \rightarrow 2(e^+e^-)$
- $X\bar{X} \rightarrow b\bar{b} \rightarrow 2(a\bar{a}) \rightarrow 4(e^+e^-)$



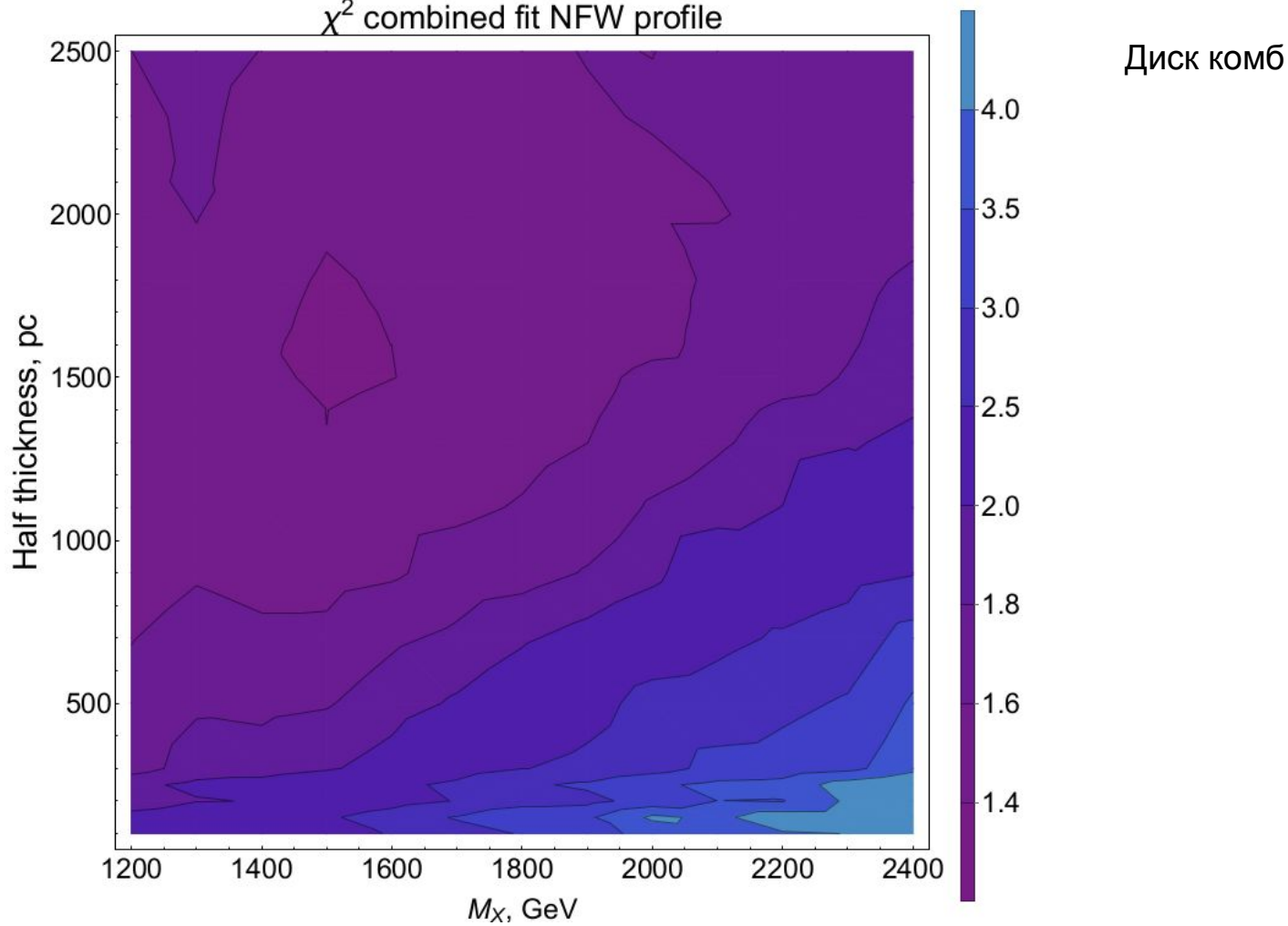
4) ГЦ + сравнение аннигиляции и распада



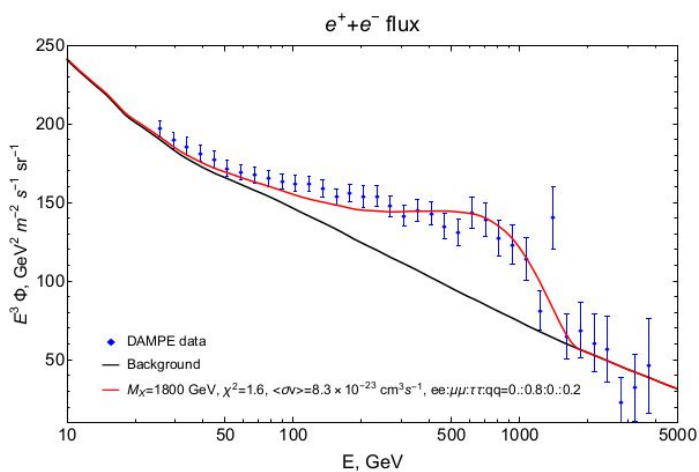
- (thick) χ^2 annihilation
- (thick) χ^2 decay
- χ_{cen}^2 annihilation
- χ_{cen}^2 decay
- - - $\chi_{\text{igrb+posi}}^2$ annihilation
- - - $\chi_{\text{igrb+posi}}^2$ decay



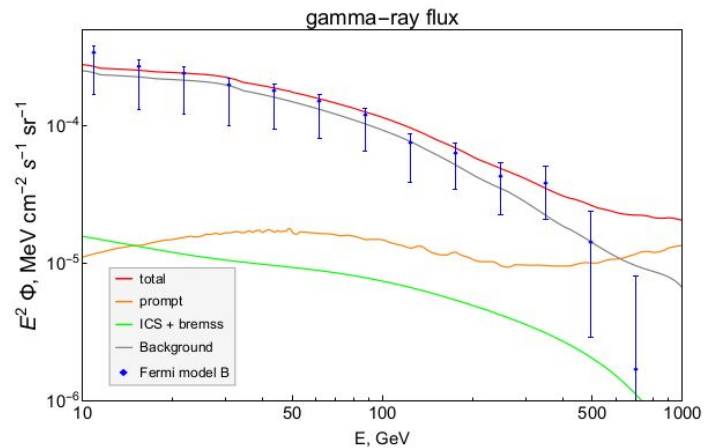
χ^2 combined fit NFW profile



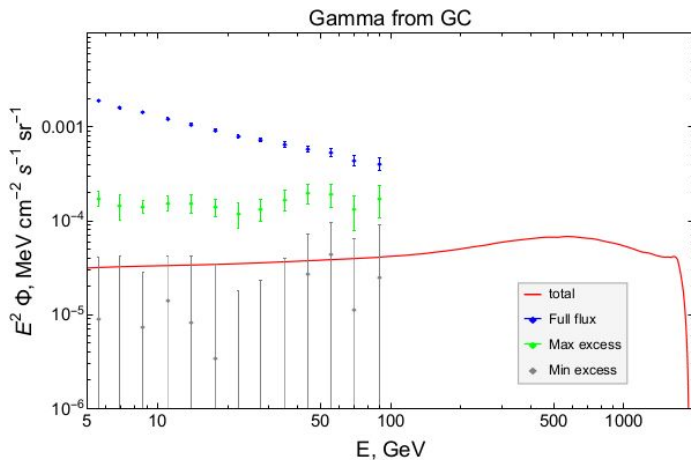
4) Кварковый канал реакции



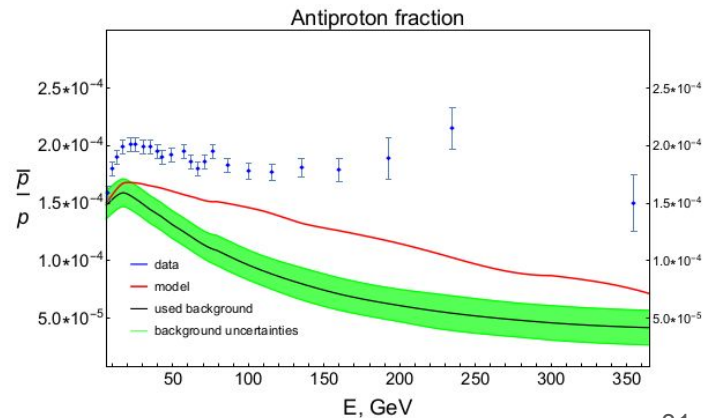
(a)



(б)



(B)



(r)

Результаты

Фит Модель	Гало	Диск
«е-фит»	203 (0.53)	22.3 (0.52)
комбинированный фит	3.8 (2.1)	2.3 (2.3)

	e, μ, τ	e, μ, τ, t		e, μ, τ, u	
		Фит \bar{p}	Непревышение \bar{p}	Фит \bar{p}	Непревышение \bar{p}
χ_{NFW}^2	2.1	5.4	2.1	10	2.1
χ_{Read}^2	2.1	4.4	1.6	9	2.1

M31

Первичное

$$\Phi_\gamma(b, l) = \frac{\langle \sigma v \rangle}{4} \sum_i Br_i \int_{10 \text{ GeV}}^{350 \text{ GeV}} \frac{dN^i}{dE_\gamma} dE_\gamma \times$$
$$\frac{1}{\Delta\Omega(b, l)} \int_0^{2R_A} \int_{\Delta\Omega(b, l)} \frac{1}{4\pi r^2} \left(\frac{\rho}{M_X} \right)^2 r^2 \cos(\theta) dr d\Omega,$$

$$E_{\gamma}^{\text{lab}} = \frac{E_{\gamma 0}^{\text{lab}}}{1 + \frac{E_{\gamma 0}^{\text{lab}}}{m_e} (1 - \cos(\theta_{\text{lab}}))}$$

$$E_{\gamma}^{\text{lab}} = \gamma (E_{\gamma} - \vec{p}_{\gamma} \cdot \vec{v}_{e0})$$

$$E_{\gamma 0}^{\text{lab}} = \gamma (E_{\gamma 0} - \vec{p}_{\gamma 0} \cdot \vec{v}_{e0})$$

$$\vec{p}_{\gamma 0}^1 = \vec{p}_{\gamma 0} + (\gamma - 1)(\vec{p}_{\gamma 0} \cdot \vec{n})\vec{n} - \gamma E_{\gamma 0} \vec{v}_{e0}$$

$$\vec{p}_{\gamma}^1 = \vec{p}_{\gamma} + (\gamma - 1)(\vec{p}_{\gamma} \cdot \vec{n})\vec{n} - \gamma E_{\gamma} \vec{v}_{e0}$$

$$\vec{p}_{\gamma 0} \cdot \vec{p}_{\gamma} = \vec{p}_{\gamma 0}^1 \cdot \vec{p}_{\gamma 0}^1$$

$$E_{\gamma} = \frac{E_{\gamma 0} (1 - v_{e0} \cos \theta)}{1 - v_{e0} + \frac{E_{\gamma 0}}{\gamma m_e} (1 - \cos \theta)}$$

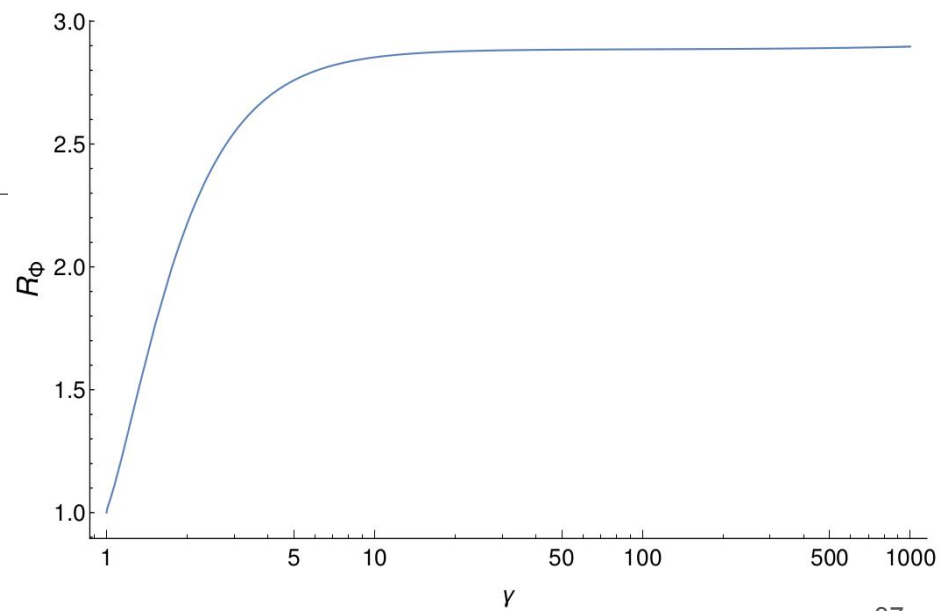
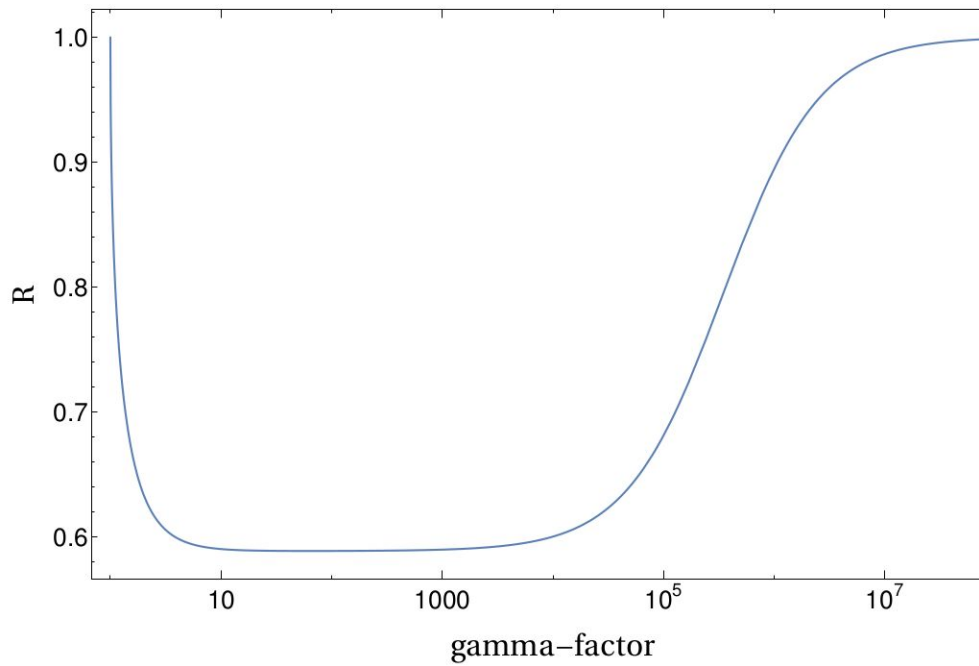
$$R = \frac{E_{\gamma}^{+}}{E_{\gamma}^{-}},$$

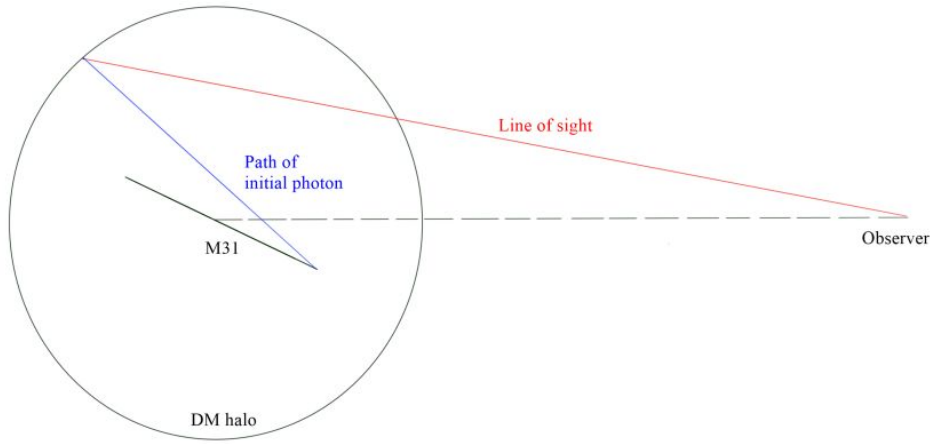
$$R_{\Phi} = \frac{\frac{d\sigma}{d\Omega} A_{+}}{\frac{d\sigma}{d\Omega} A_{-}},$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{d\sigma}{d\Omega^l} \left| \frac{d\Omega^l}{d\Omega} \right|,$$

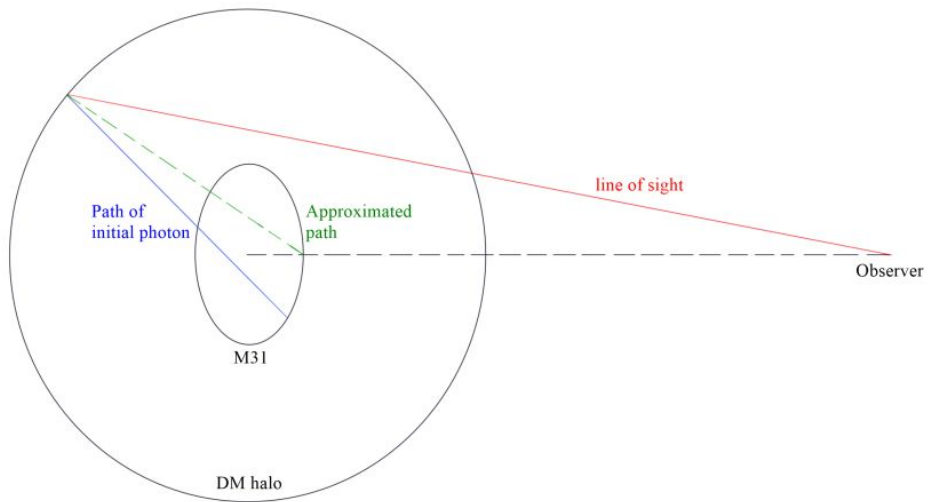
$$\frac{d\sigma}{d\Omega^l} = \frac{1}{2} r_e^2 \lambda^2 \left(\lambda + \frac{1}{\lambda} - 1 + \cos^2 \theta_{lab} \right),$$

$$\frac{d\Omega^l}{d\Omega} = \frac{d\theta_{lab}}{d\theta} = \frac{d\theta_{lab}}{d\cos\theta_{lab}} \frac{d\cos\theta_{lab}}{d\cos\theta} \frac{d\cos\theta}{d\theta} = \frac{\sin\theta}{\sin\theta_{lab}} \frac{d\cos\theta_{lab}}{d\cos\theta},$$

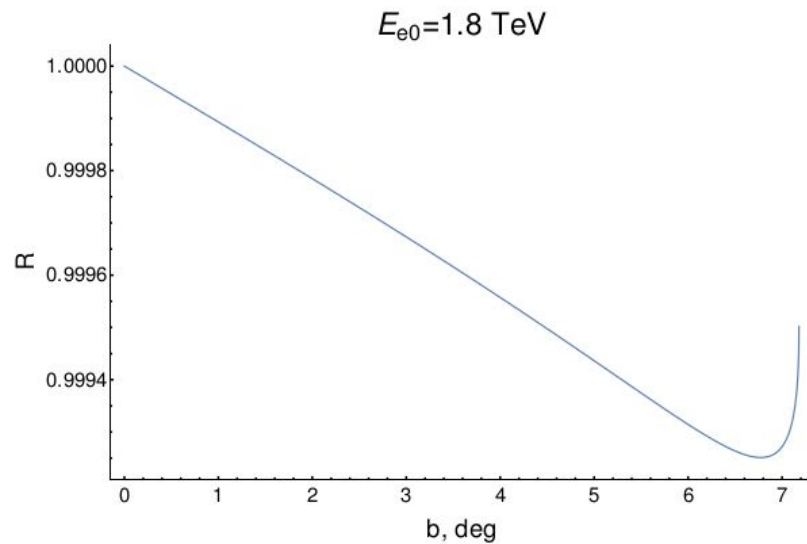
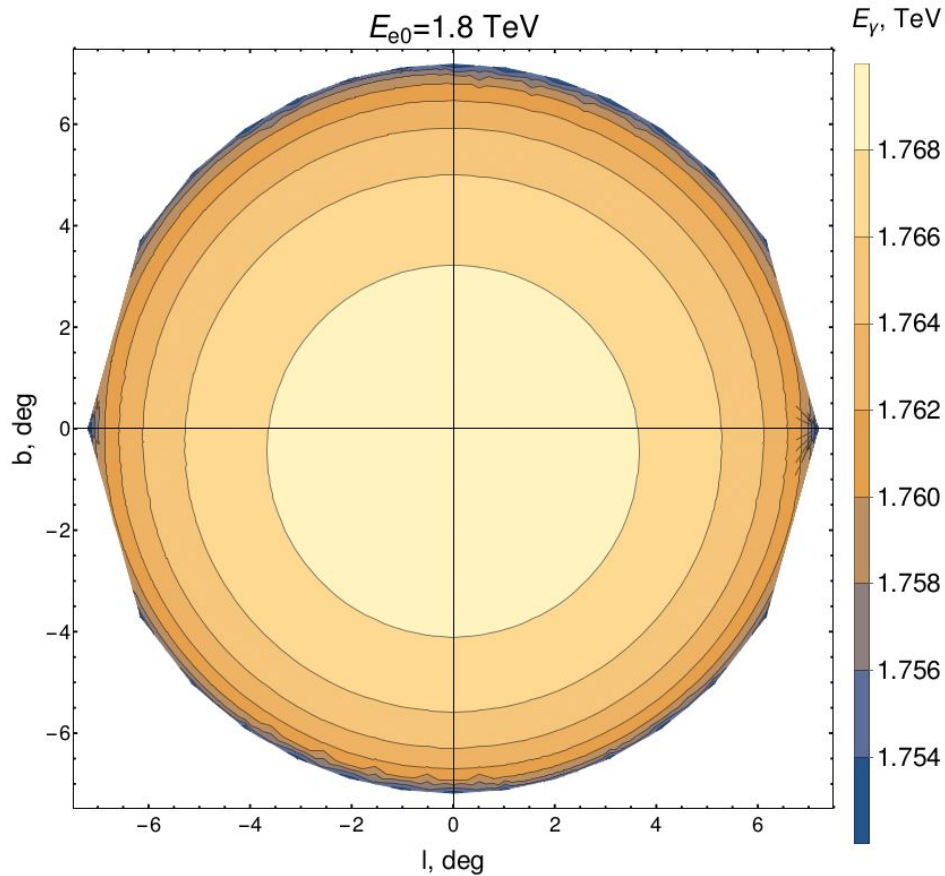




(a)



3D модель. Гало



$$\Phi(E_\gamma) = \frac{dN}{dE \cdot dt \cdot dS \cdot d\Omega} =$$

$$= \frac{1}{\Delta\Omega_{\text{l.o.s.}}} \int_{\text{l.o.s.}} r^2 dr d\Omega_{\text{l.o.s.}} \int_{\text{Andr}} dS_{\text{Andr}} \int_{\text{el. dir}} d\Omega_e \frac{dn_e}{d\Omega_e} \times$$

$$\times \frac{dn_\gamma}{dS_{\text{Andr}}} \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega_{\text{scattering}}} \cdot \Delta\Omega_{\text{scattering}} \cdot v_{\text{rel}} \cdot \frac{1}{\Delta\Omega_{\text{scattering}} r^2} \cdot \frac{dN}{dE}$$

$$\frac{dn_e}{d\Omega_e} = \frac{d^2 n_e}{d\Omega_e dt} \Delta t = \frac{1}{4\pi} 2 \frac{\rho_{DM}^2}{4M_X^2} \langle \sigma v \rangle_{DM} \times \frac{l_e}{c} = \frac{\rho_{DM}^2}{8M_X^2} \langle \sigma v \rangle_{DM} \times \frac{1}{cn_\gamma \sigma},$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{\text{scattering}}} = \frac{d\sigma}{d\Omega_{\text{lab}}} \cdot \left| \frac{d\Omega_{\text{lab}}}{d\Omega_{\text{scattering}}} \right|$$

$$\left| \frac{d\Omega_{\text{lab}}}{d\Omega_{\text{scattering}}} \right| = \left| \frac{\partial \cos(\theta_{\text{lab}})}{\partial \cos(\theta)} \right| \cdot \left| \frac{\partial \varphi_{\text{lab}}}{\partial \varphi} \right|$$

$$\sigma = \begin{cases} \pi r_e^2 \frac{m_e}{E_{\gamma 0}^{\text{lab}}} \left(\log \left(2 \frac{E_{\gamma 0}^{\text{lab}}}{m_e} \right) + \frac{1}{2} \right), & E_{\gamma 0}^{\text{lab}} \gg m_e \quad (M_X = 1.8 \text{ T}\varnothing\text{B}) \\ \frac{8}{3} \pi r_e^2 \left(1 - 2 \frac{E_{\gamma 0}^{\text{lab}}}{m_e} \right), & E_{\gamma 0}^{\text{lab}} \ll m_e \quad (M_X = 100 \text{ M}\varnothing\text{B}) \end{cases}$$

$$n_\gamma(\vec{r}) = \int_0^{R_A} \int_0^{2\pi} r_a \frac{dn_\gamma}{dS_{\text{Andr}}} dr_a d\varphi_a,$$

$$\frac{dn_\gamma}{dS_{\text{Andr}}}(\vec{r}) = \frac{L_A}{4\pi R_A^2 E_{\gamma 0}} \cdot \frac{1}{4\pi c |\vec{r}_a - \vec{r}|^2}$$

$$\frac{dN}{dE} = \delta(E - E_\gamma)$$

$$\Phi \sim \frac{\pi R_A^2}{2} \left(\Delta r_u \Delta \Omega_u \frac{dn_e}{d\Omega}^u \frac{dn_\gamma}{dS_{\text{Andr}}}^u \frac{d\sigma}{d\Omega_s}^u + \right. \\ \left. + \Delta r_d \Delta \Omega_d \frac{dn_e}{d\Omega}^d \frac{dn_\gamma}{dS_{\text{Andr}}}^d \frac{d\sigma}{d\Omega_s}^d \right) \frac{c}{\Delta E_\gamma},$$

$$\Phi \approx \frac{c}{\Delta E_\gamma} \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{10} \sum_{k=1}^{12} \sum_{n=1}^{12} \sum_{m=1}^{10} \Delta r^i \Delta \Omega_e^{nm} \Delta S_{\text{Andr}}^{jk} \times \\ \times \frac{dn_e}{d\Omega}(r^i, \varphi_e^n, \theta_e^m) \frac{dn_\gamma}{dS_{\text{Andr}}}(r^i, r_A^j, \varphi_A^k) \frac{d\sigma}{d\Omega_s}(r^i, r_A^j, \varphi_A^k, \varphi_e^n, \theta_e^m),$$

M	b, °	E_{\max}	$E^2 d\Phi/dE$	R	R_{ϕ}
1,8 ТэВ	± 6	1777 ГэВ	$5 \cdot 10^{-11}$ ГэВ/см ² *с*ср	1	1
100 МэВ	6	270 кэВ	$4,5 \cdot 10^{-10}$ кэВ/см ² *с*ср	0,96	45
	-6	280 кэВ	10^{-11} кэВ/см ² *с*ср		

