

Институт ядерной физики и технологий
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И КОСМОЛОГИЯ»

Выпускная квалификационная работа магистра
по направлению подготовки: 14.04.02 Ядерная физика и технологии
Направленность (профиль): Физика элементарных частиц и космология

**«ВОЗМОЖНЫЕ ЭФФЕКТЫ В КОСМИЧЕСКОМ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИИ ОТ
РАСПАДА ИЛИ АННИГИЛЯЦИИ ЧАСТИЦ СКРЫТОЙ МАССЫ»**

Выполнила: студентка гр. М18-115

Научный руководитель к.ф.-м.н.

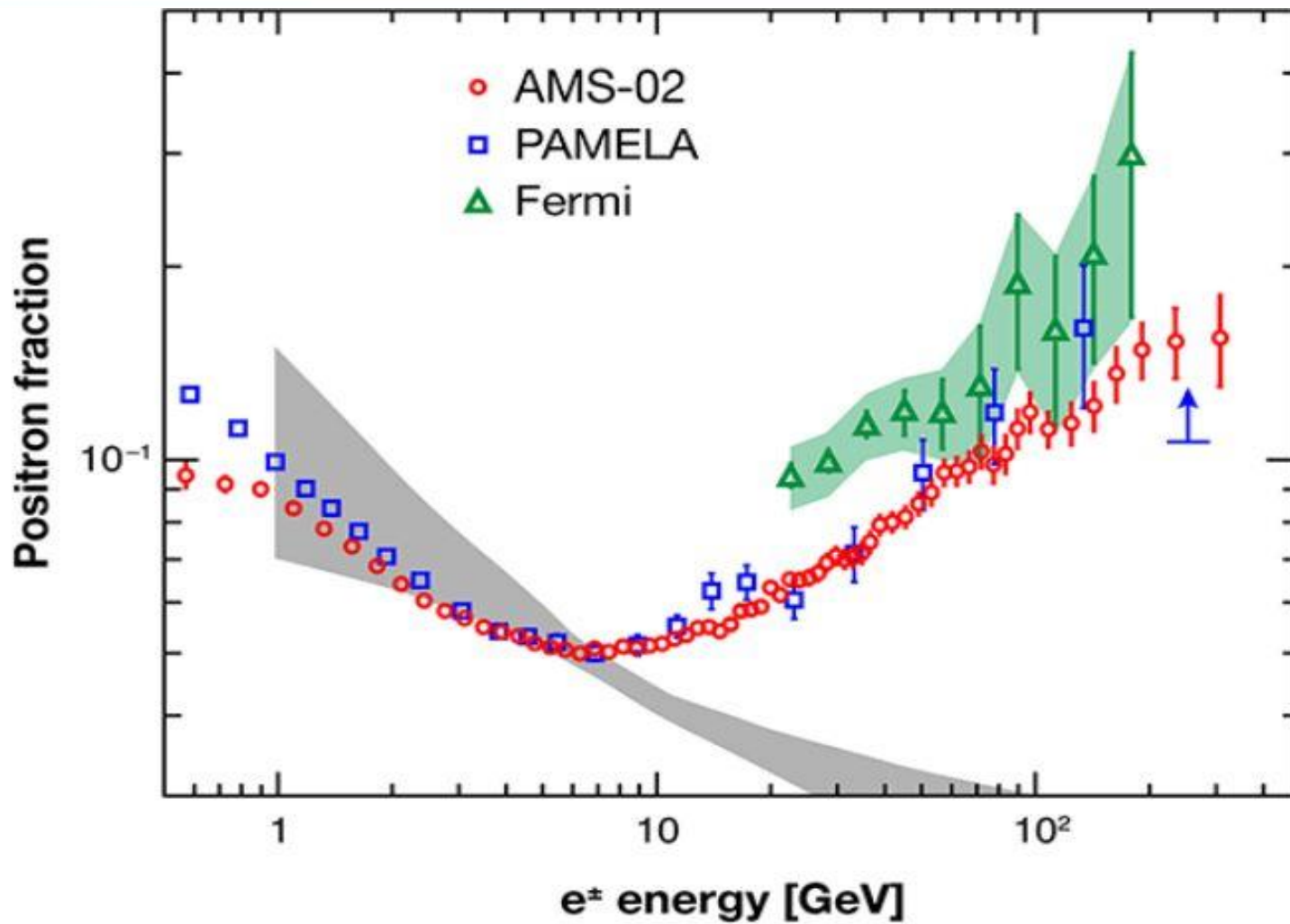
Шлепкина Е.С.

Белоцкий К. М.

ВВЕДЕНИЕ

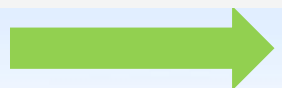
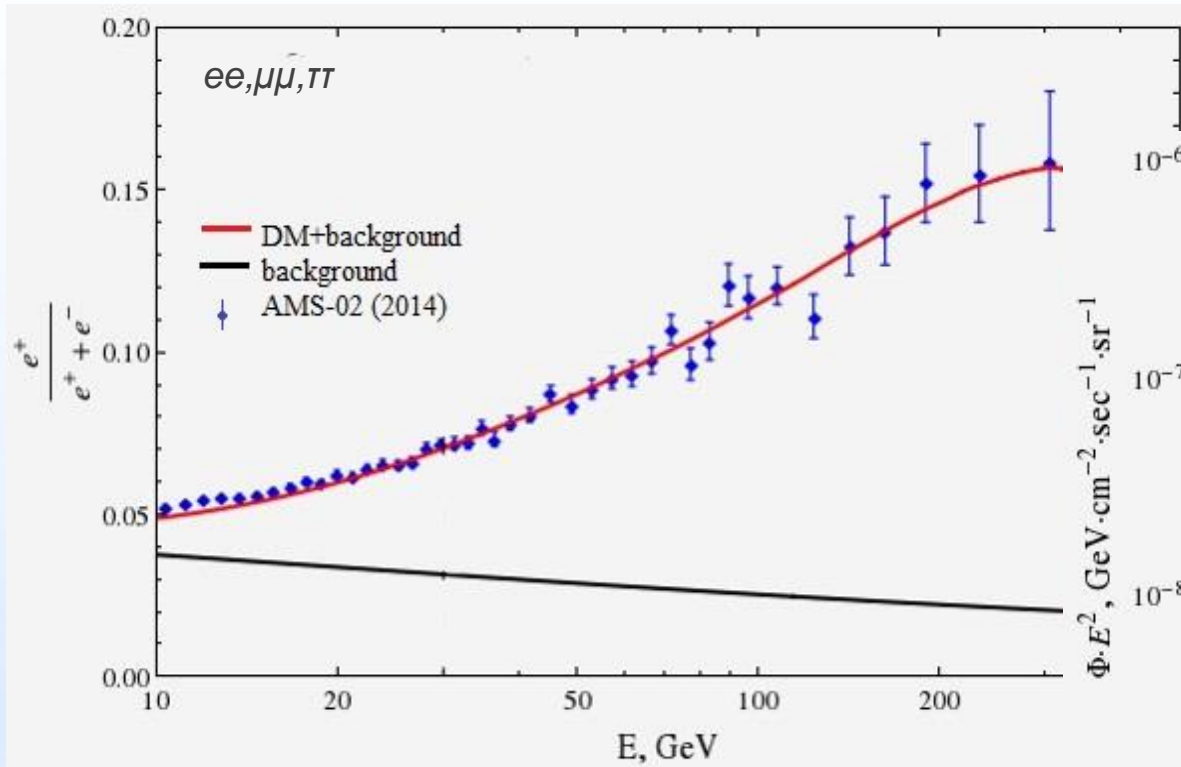
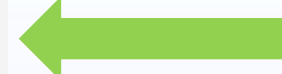
- Проблема происхождения позитронной аномалии в космических лучах («Эффект «ПАМЕЛЫ»).
- Объяснение данной аномалии с помощью распада или аннигиляции частиц DM с позитронами в конечном состоянии.
- Возникновение гамма-излучения в конечном состоянии и, следовательно, поиск подавления выхода гамма-излучения при распаде частицы скрытой массы.
- Возникновение потоков гамма-излучения за счет Обратного Комптоновского Рассеяния (ICS) фотонов на высокоэнергетичных лептонах
- Возможная угловая анизотропия в светимости от источника M31

ПОЗИТРОННАЯ АНОМАЛИЯ

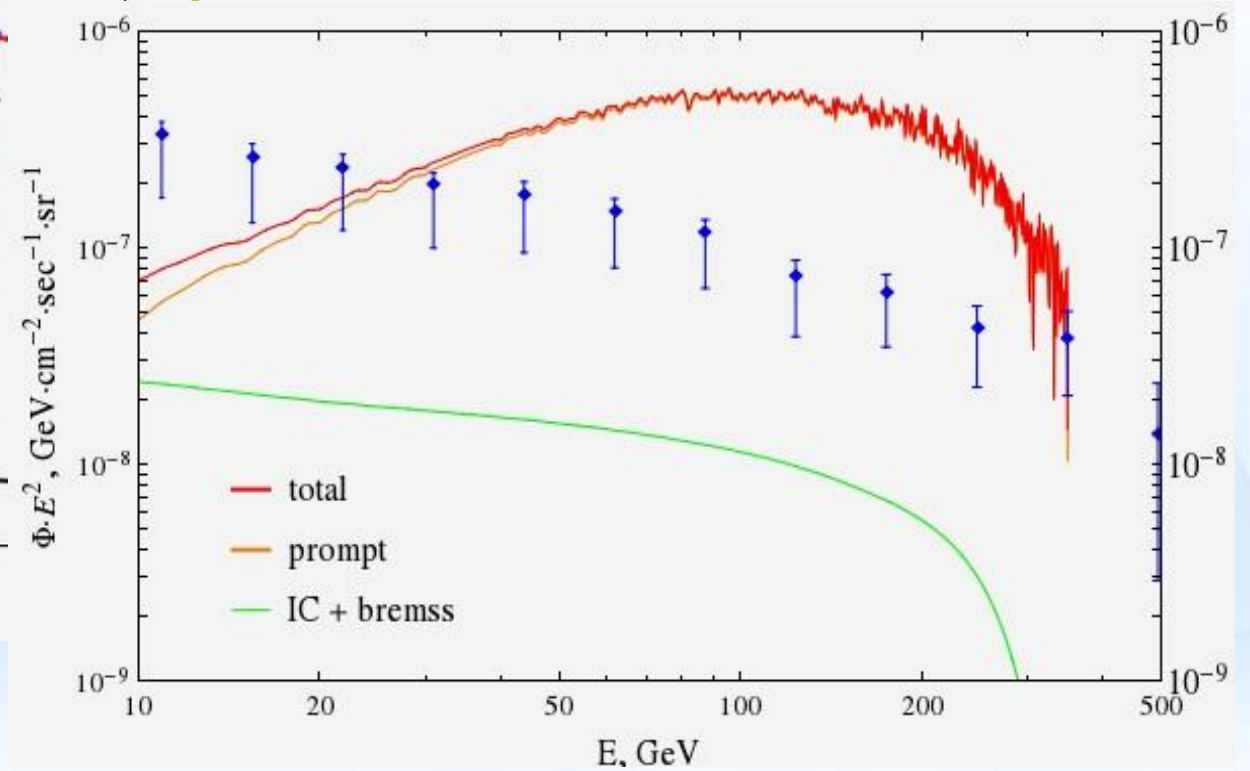


ПРОТИВОРЕЧИЕ С ДАННЫМИ ПО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЮ

Хорошо согласуется с
данными PAMELA и
AMS-02



Возникают противоречия
с данными Fermi-LAT



ВОЗМОЖНЫЕ ТИПЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СМ

В данной работе исследуются модели скрытой массы, состоящие из гипотетических долгоживущих частиц X , с массами порядка 1 ТэВ.

Частица X может быть:

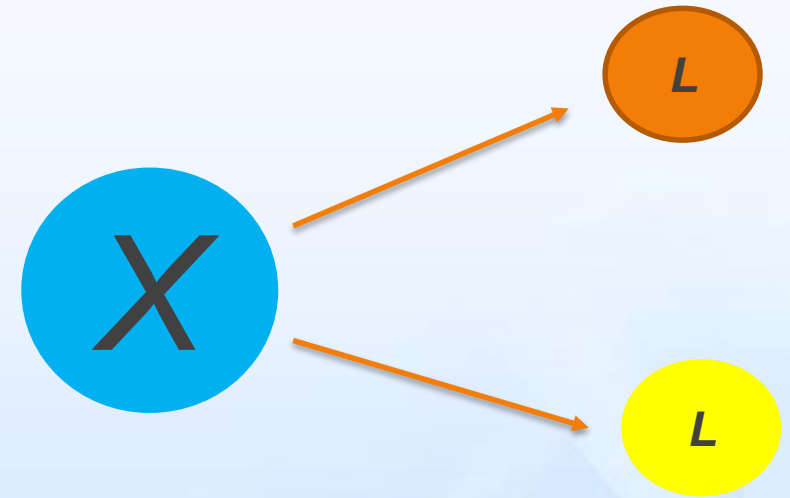
- Скалярной
- Псевдоскалярной
- Векторной
- Псевдовекторной

$$L_S = X \bar{\psi} \psi$$

$$L_{ps} = X \bar{\psi} \gamma^5 \psi$$

$$L_V = \bar{\psi} \gamma^\mu \psi X_\mu$$

$$L_{pv} = \bar{\psi} \gamma^\mu \gamma^5 \psi X_\mu$$



ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ЛАГРАНЖИАНА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Идея состоит в том, чтобы использовать различные комбинации векторной и аксиал-векторной (или скалярной и псевдоскалярной) связи, чтобы понять как нужно варьировать константы связи, чтобы подавить фотон.

$$L_{\text{scalar}} = X \bar{\psi} (a + b\gamma^5) \psi$$

$$L_{\text{vector}} = \bar{\psi} \gamma^\mu (a + b\gamma^5) X_\mu \psi$$

a и b - параметры этой модели, отвечающие за смешивание скалярной и псевдоскалярной связи

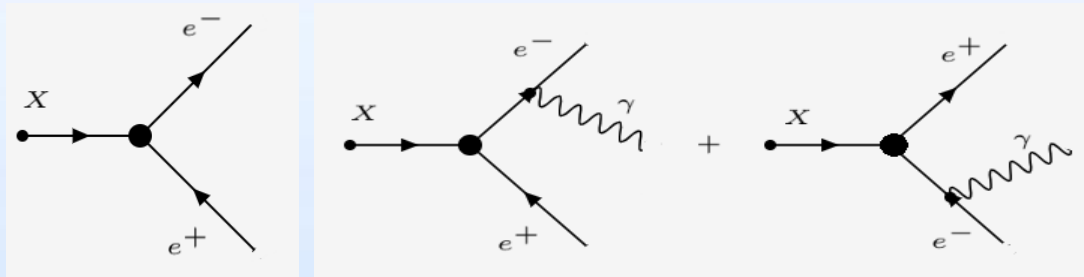
- Тогда подавление FSR будет означать что:

$$\frac{\Gamma(X \rightarrow e^+ e^\pm \gamma)}{\Gamma(X \rightarrow e^+ e^\pm)} = \min$$

ПРОСТЕЙШИЕ МОДЕЛИ РАСПАДА ЧАСТИЦЫ СМ

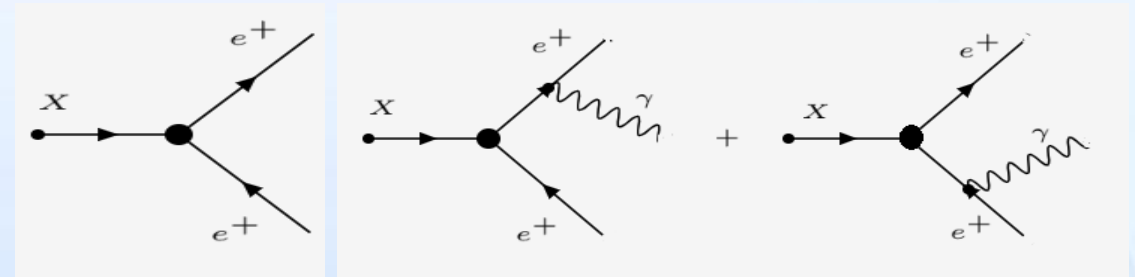
Главным образом, рассматривались две модели частицы скрытой массы:

Простейшая модель распада частицы скрытой массы на два противоположно заряженных лептона ($X \rightarrow e^+e^-$, $X \rightarrow e^+e^-\gamma$)



$$L = X\bar{\psi}(a + b\gamma^5)\psi + X\bar{\psi}(a - b\gamma^5)\psi + \bar{\psi}\gamma^\mu A_\mu\psi$$

Модель распада частицы скрытой массы на два позитрона ($X \rightarrow e^+e^+$, $X \rightarrow e^+e^+\gamma$)



$$L = X\bar{\psi}^C(a + b\gamma^5)\psi + X^*\bar{\psi}(a - b\gamma^5)\psi^C + \bar{\psi}\gamma^\mu A_\mu\psi$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Чтобы получить квадраты матричных элементов для указанных процессов, были использованы программные пакеты LanHEP и CalcHEP

Для скалярной X :

$$X \rightarrow e^+ + e^+$$

$$|M|^2 = 4m_x^2 \underline{(a^2 + b^2)}$$

$$X \rightarrow e^+ + e^+ + \gamma$$

$$|M|^2 = 16 \underline{(a^2 + b^2)}$$

Для векторной X :

$$X \rightarrow e^+ + e^+$$

$$|M|^2 = 8 \underline{m_x^2} b^2$$

$$X \rightarrow e^+ + e^+ + \gamma$$

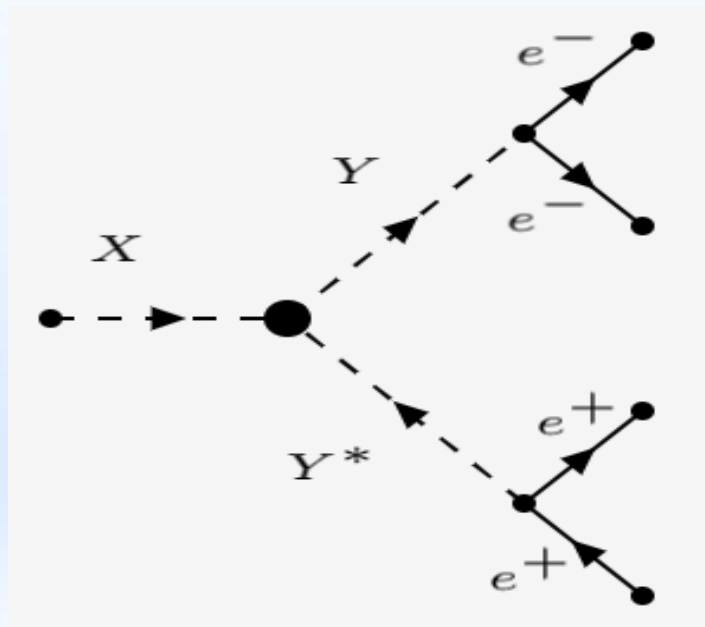
$$|M|^2 = \underline{16} b^2 \dots$$

Отношение ширин распада этих процессов не зависит от параметров a и b . Таким образом, можно утверждать, что в распадах такого типа скрытой массы нельзя добиться подавления FSR

МОДЕЛЬ СКРЫТОЙ МАССЫ С ТЯЖЕЛОЙ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТИЦЕЙ

Необходимо усложнять предыдущие модели.

Далее был рассмотрен распад незаряженной самосопряженной частицы X в некоторые тяжелые Y ($Q = +2$) и Y^* ($Q = -2$)



Таким образом, мы можем рассмотреть различные вариации такой модели:

1. X, Y – скалярные;
2. X -векторная, Y -скалярная;
3. X, Y -векторные;
4. X -скалярная, Y -векторная;
- ...

МОДЕЛЬ СКРЫТОЙ МАССЫ С ТЯЖЕЛОЙ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТИЦЕЙ

- 1) X, Y – скалярные

$$\mathcal{L} = cX\bar{Y}Y + Y\bar{\psi}^c(a + b\gamma^5)\psi + Y^*\bar{\psi}(a - b\gamma^5)\psi^c - \bar{\psi}\gamma^\mu A_\mu\psi + A_\mu Y\partial^\mu Y^* + A_\mu Y^*\partial^\mu Y \quad (7)$$

В данном случае также наблюдалось сокращение параметризации

- 2) X -векторная Y -скалярная

$$\mathcal{L} = Y\partial^\mu X_\mu Y^* + X_\mu\partial^\mu Y Y^* + X_\mu\partial^\mu Y^* Y + X_\mu A^\mu Y^* Y + Y\bar{\psi}^c(a + b\gamma^5)\psi + Y^*\bar{\psi}(a - b\gamma^5)\psi^c - \bar{\psi}\gamma^\mu A_\mu\psi + A_\mu Y\partial^\mu Y^* + A_\mu Y^*\partial^\mu Y \quad (8)$$

$|M|^2 = 0$ (В случае двухчастичного распада)

Также были проверены другие вариации такой модели скрытой массы. Подавления выхода фотонов не обнаружено

ОДНОФОТОННАЯ ТЕОРЕМА

- Появление «радиационных нулей» в различных моделях
- Узкая область кинематических параметров

Условия теоремы:

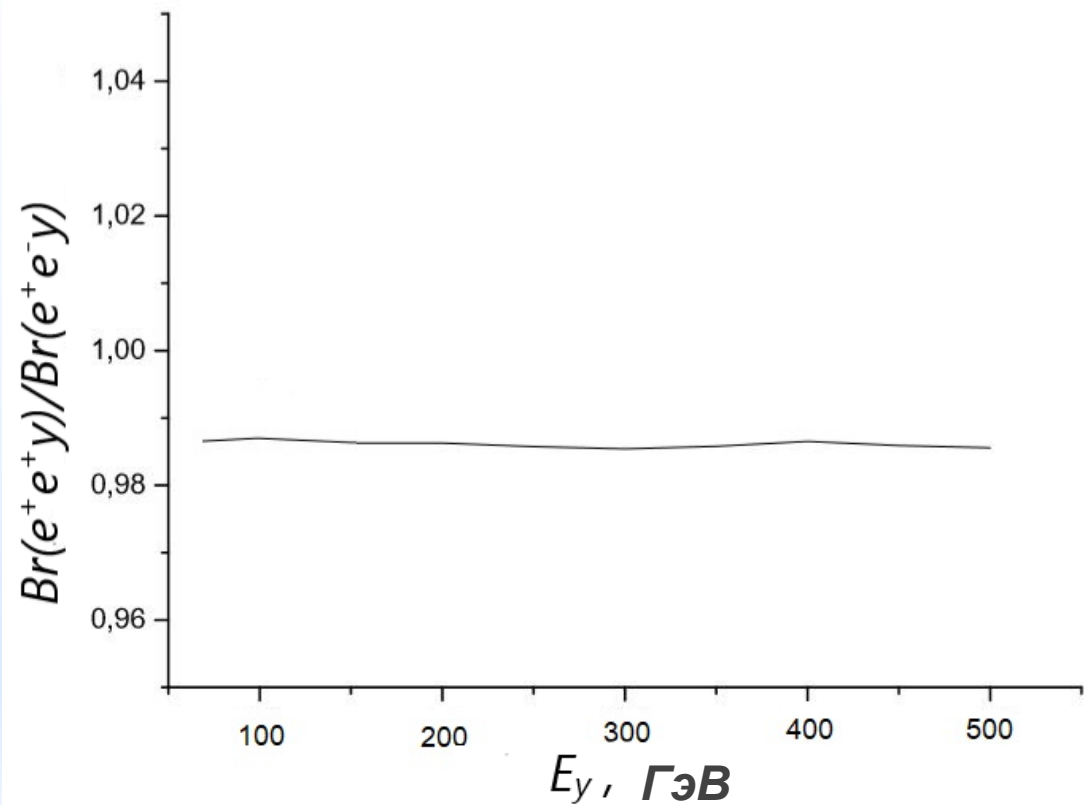
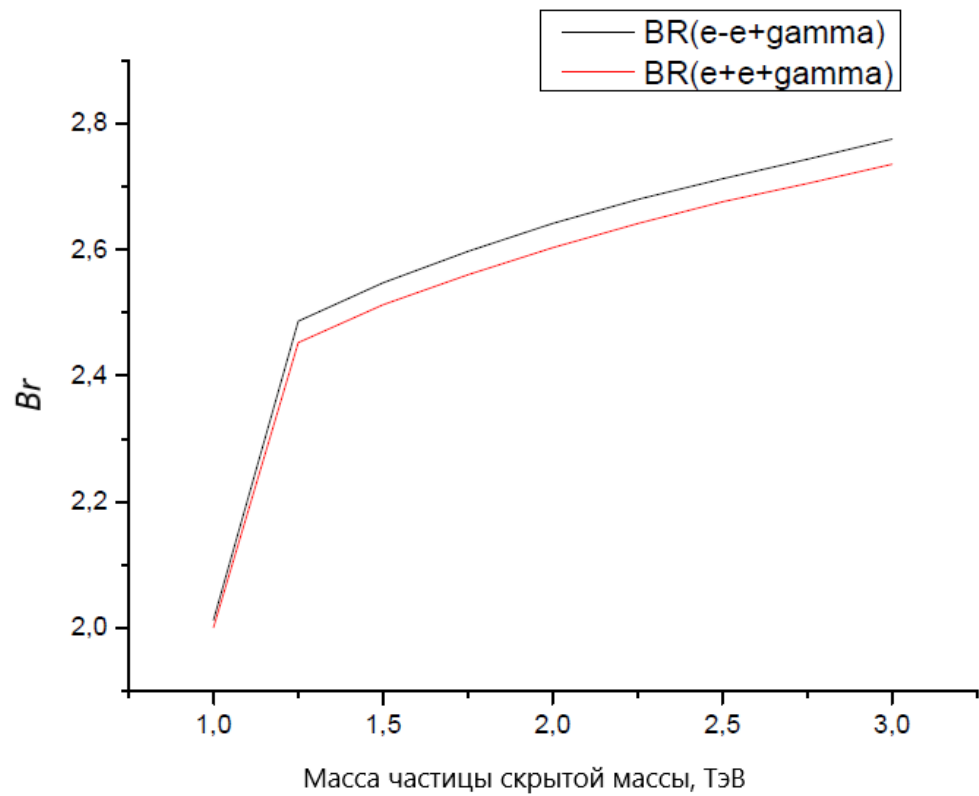
$$M_\gamma = 0,$$
$$\text{If } \frac{Q_i}{p_i \cdot q} = \text{same, all } i$$

i -тая частица имеет заряд Q_i и 4-импульс p_i ,
 q – 4-импульс фотона

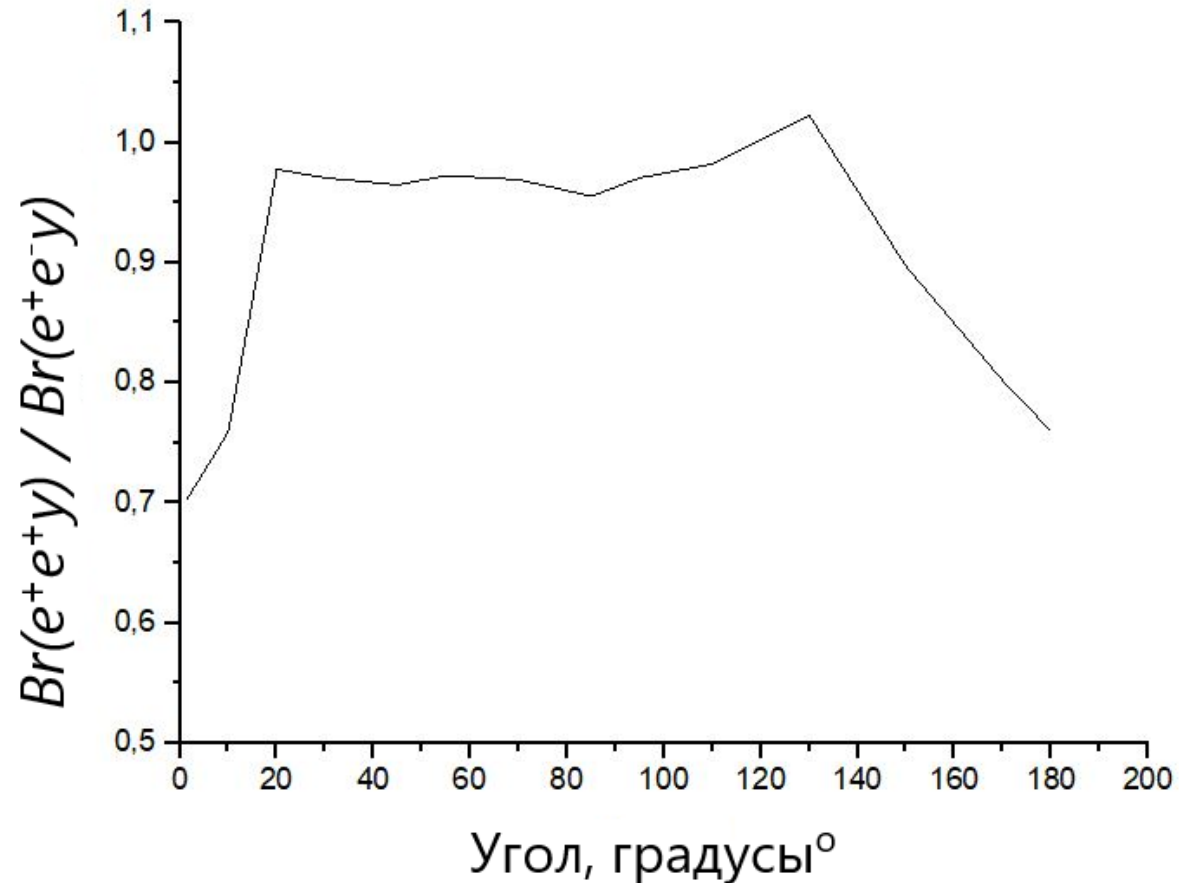
Анализ вклада:

$$\frac{Br(e^+e^+\gamma)}{Br(e^+e^-\gamma)} = \min$$

ВКЛАД В ЭФФЕКТ ПОДАВЛЕНИЯ ФОТОНА



ВКЛАД В ЭФФЕКТ ПОДАВЛЕНИЯ ФОТОНА



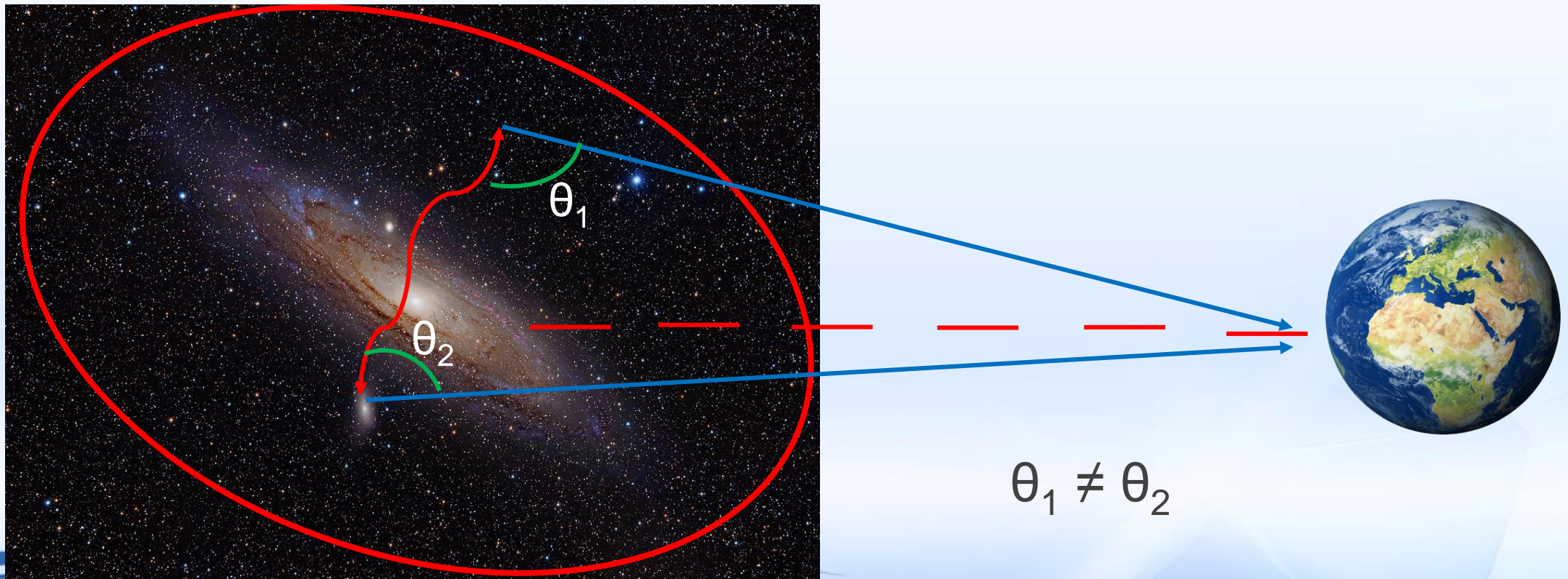
Существует диапазон углов разлета между фотоном и соответствующей частицей, в котором наблюдается некоторое подавление выхода фотона (около 30%)

ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ ЗА СЧЕТ ОБРАТНОГО КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ОТ АННИГИЛЯЦИИ ЧАСТИЦЫ СКРЫТОЙ МАССЫ

УГЛОВАЯ АНИЗОТРОПИЯ ОТ ICS ФОТОНОВ

Формула Клейна - Нишины

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon'_1 d\Omega'_1} = \frac{3}{16\pi} \sigma_T \left(\frac{\epsilon'_1}{\epsilon'} \right)^2 \left(\frac{\epsilon'}{\epsilon'_1} + \frac{\epsilon'_1}{\epsilon'} - \sin^2 \theta'_1 \right) \delta \left(\epsilon'_1 - \frac{\epsilon'}{1 + \frac{\epsilon'}{m}(1 - \cos \theta'_1)} \right)$$



РАССЧЕТ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОТОКА

$$\frac{d\Phi}{d\epsilon_1} = \frac{1}{\epsilon_1} \frac{\langle \sigma_{ann} v \rangle}{4\pi} r_{\odot} \frac{\rho_0^2}{M_{DM}^2} \bar{J} \Delta\Omega \int_{m_e}^{M_{DM}} dE \mathcal{P}(\epsilon_1, E, r)$$

Не учитывается угловая анизотропия!

ϵ_1 – энергия рассеянного фотона

ϵ – энергия начального фотона

$\langle \sigma_{ann} v \rangle \approx 3 \cdot 10^{-26}$ см³/сек – сечение аннигиляции

ρ_0 - плотность скрытой массы в М31

$M_{DM} = 1 - 3$ ТэВ – массы частицы СМ

$\Delta\Omega = 3^\circ \times 5^\circ$ - Телесный угол охватывающий М31 и ее темного гало

Где \bar{J} - геометрический фактор

$$\bar{J} \Delta\Omega = \int_{\Delta\Omega} d\Omega \int_{\text{line-of-sight}} \frac{ds}{r_{\odot}} \left(\frac{\rho(r)}{\rho_{\odot}} \right)^2$$

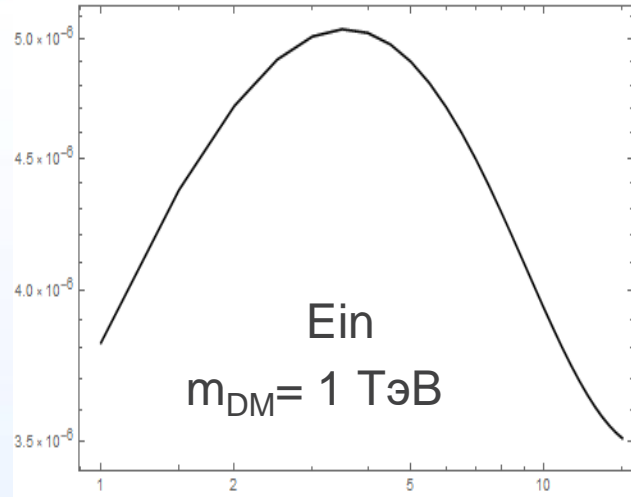
$\mathcal{P}(\epsilon_1, E, r)$ - дифференциальная мощность излучения электронов в фотоны

$$\rho_{Ein}(r) = \rho_s \exp \left[-\frac{2}{\alpha} \left(\left(\frac{r}{r_s} \right)^\alpha - 1 \right) \right], \quad \alpha = 0.17$$

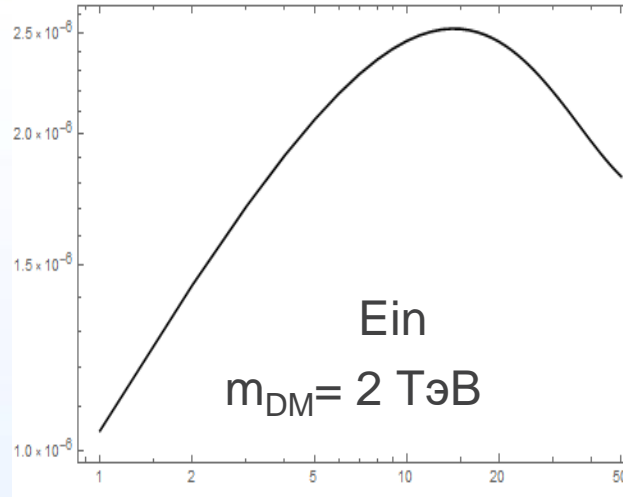
$$\rho_{NFW}(r) = \rho_s \frac{r_s}{r} \left(1 + \frac{r}{r_s} \right)^{-2}$$

СИГНАЛЫ ОТ ICS ФОТОНОВ

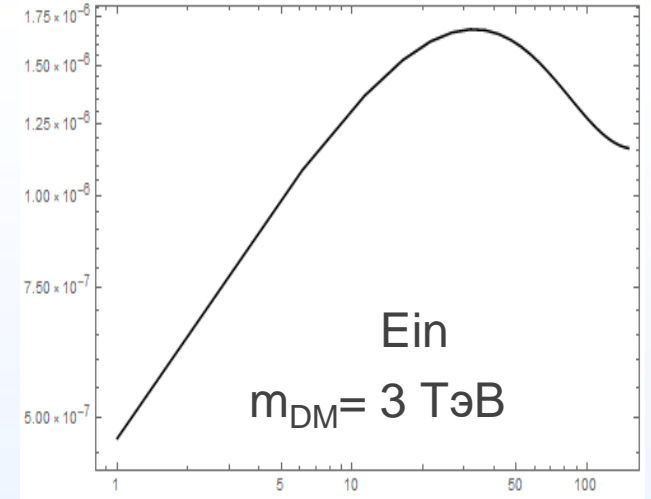
$E^2 d\Phi/dE$ в ГэВ/см² с ср



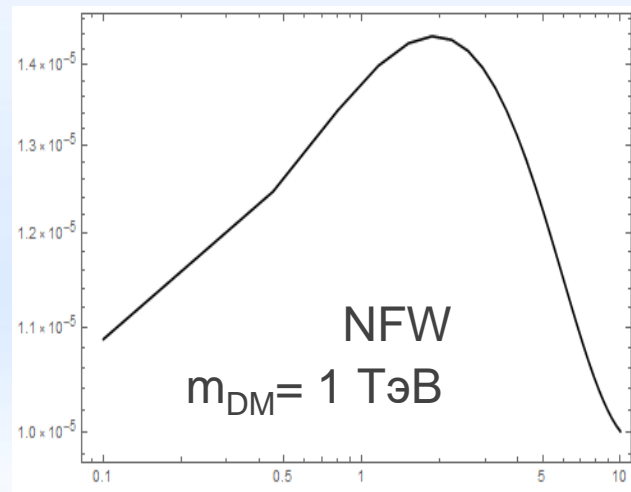
$E^2 d\Phi/dE$ в ГэВ/см² с ср



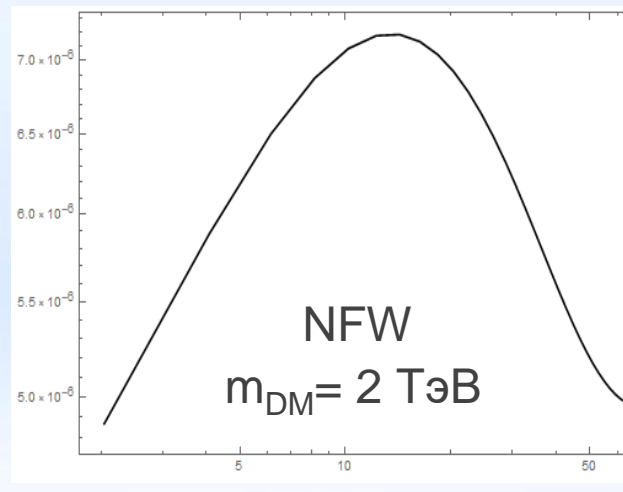
$E^2 d\Phi/dE$ в ГэВ/см² с ср



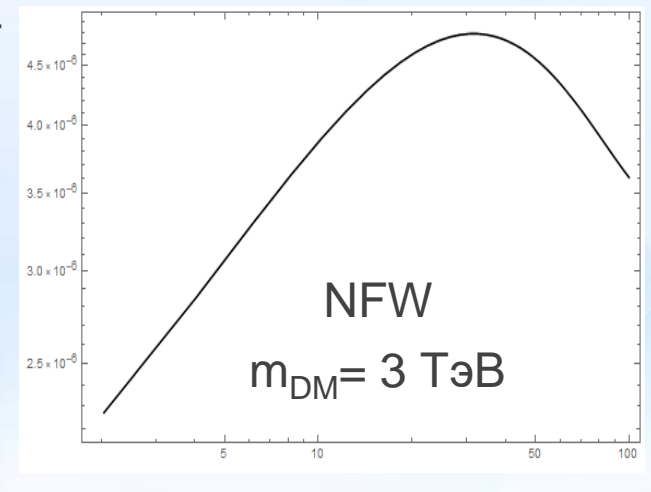
$E^2 d\Phi/dE$ в ГэВ/см² с ср



$E^2 d\Phi/dE$ в ГэВ/см² с ср



$E^2 d\Phi/dE$ в ГэВ/см² с ср

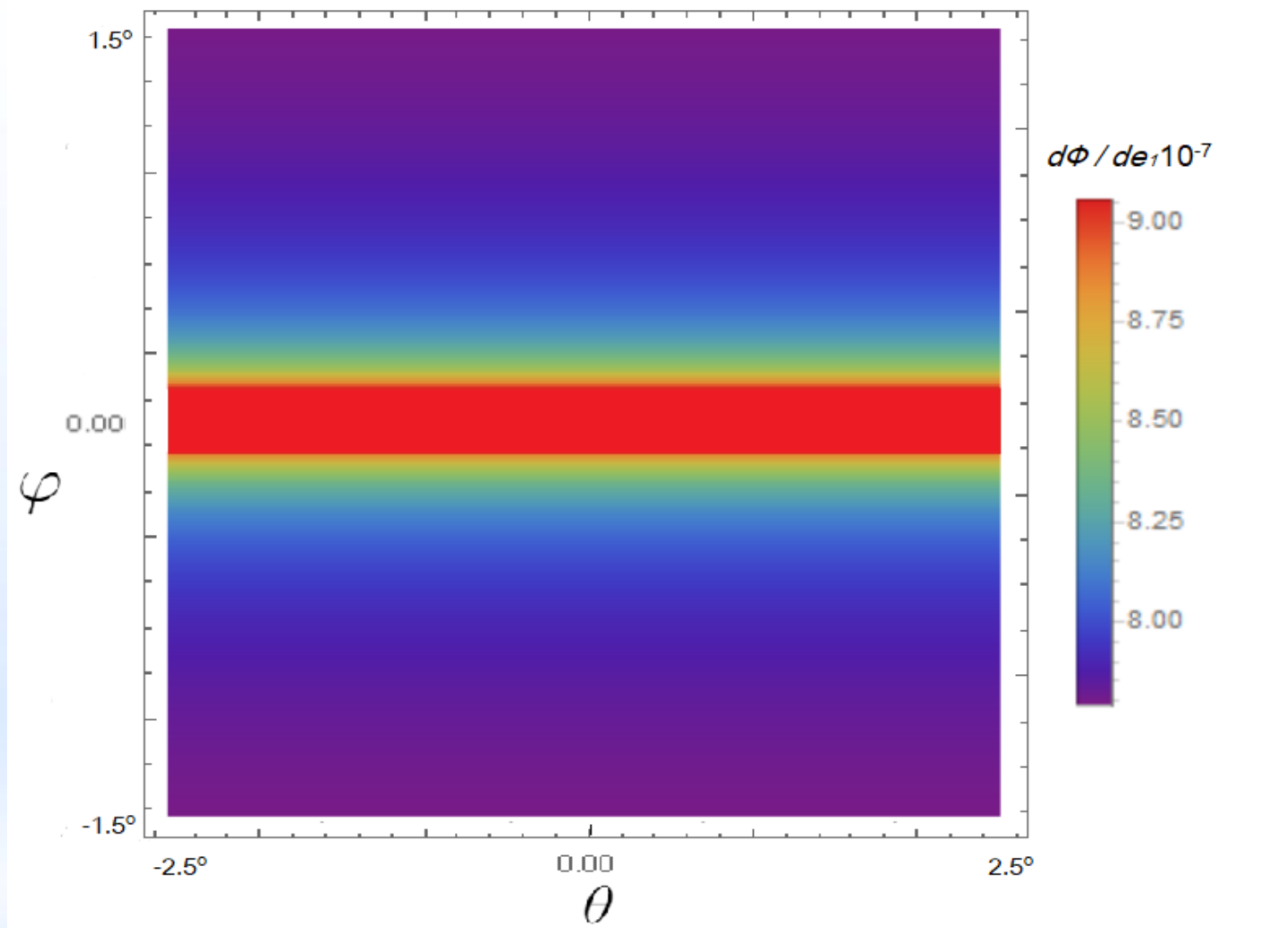


Энергия γ , в ГэВ

Энергия γ , в ГэВ

Энергия γ , в ГэВ

КАРТА ПОТОКОВ ДЛЯ ИЗОТРОПНОГО СЛУЧАЯ



КАРТА ПОТОКОВ В АНИЗОТРОПНОМ СЛУЧАЕ

$$\frac{d\Phi}{d\epsilon_1} = \frac{1}{\epsilon_1} \frac{\langle \sigma_{ann} v \rangle}{4\pi} r_0 \frac{\rho_0^2}{M_{DM}^2} \int_{\Delta\Omega} d\Omega \int_{\text{l.o.s.}} \frac{ds}{r_0} \left(\frac{\rho(r)}{\rho_0} \right)^2 \times$$

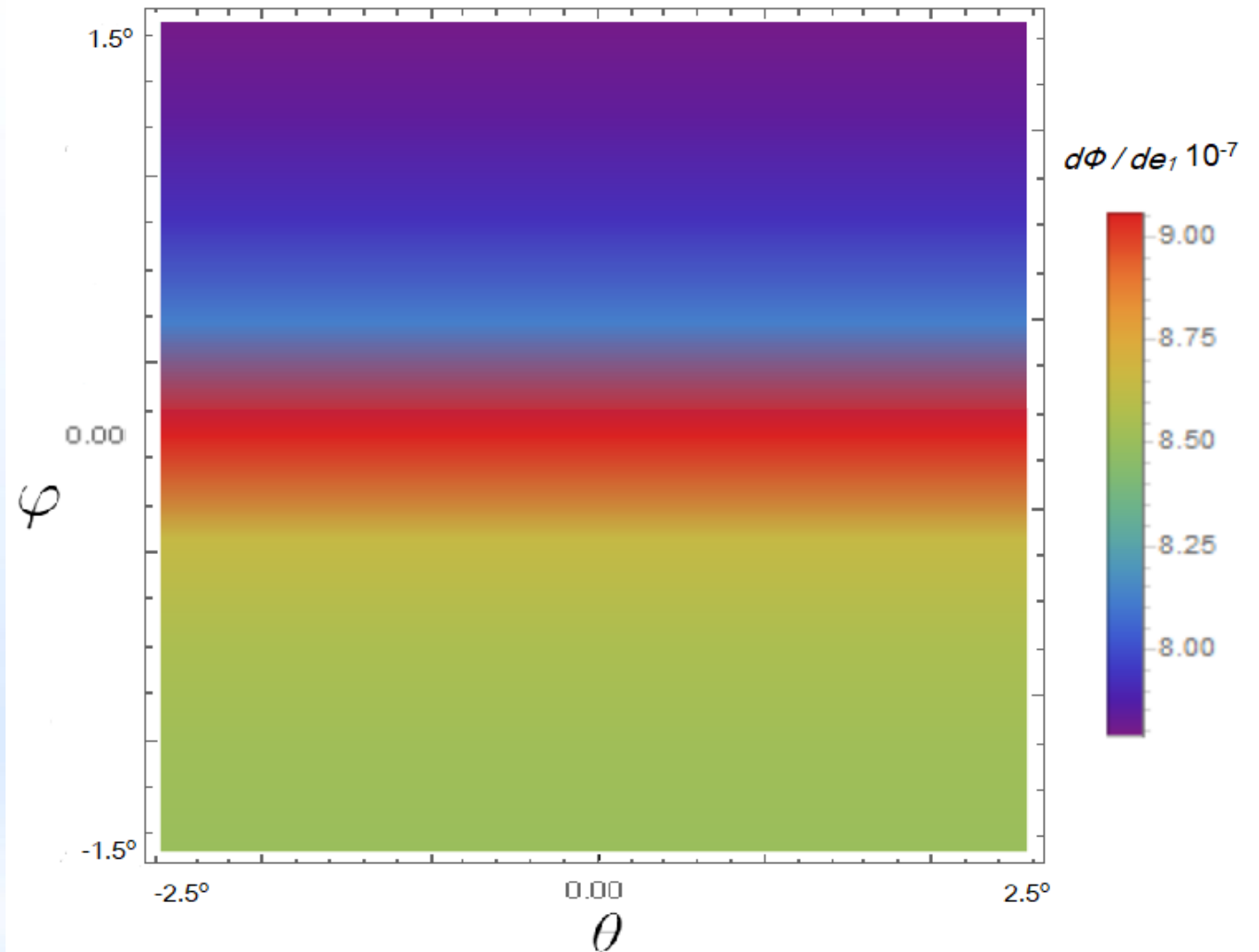
$$\times \int_{\Omega_\gamma} d\Omega_\gamma Q_\gamma(\Omega_\gamma) \int_{m_e}^{M_{DM}} dE \mathcal{P}(\epsilon_1, E, r).$$

$$Q_\gamma(r, \alpha) = \frac{1}{\pi Y(r)} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \sin^2 \alpha \right)^{-1/2},$$

$$Y(r) = 1 - \frac{r^2 - R^2}{2rR} \ln \left(\frac{r+R}{r-R} \right)$$

$$\left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right)^{1/2} \leq \cos \alpha \leq 1$$

α – угол налета фотона, R – радиус галактического темного гало M31 и r – расстояние до M31



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам настоящей магистерской диссертации:

- была проведена разработка и анализ различных моделей скрытой массы, с упором на модели распадающиеся на два тождественных позитрона в конечном состоянии;
- были предложены два механизма подавления FSR: параметризация лагранжиана взаимодействия и тождественность частиц в конечном состоянии;
- Было выявлено, что частичное подавление фотона (около 30%) наблюдается в случае тождественных позитронов при определенных значениях угла разлета между фотоном и излучившей его частицей;

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- была рассмотрена методика расчета изотропного дифференциального потока гамма-излучения от аннигиляции или распада частиц скрытой массы, возникающего за счет ICS на фотонах межзвездной среды в случае их изотропного рассеяния в данном процессе;
- построена карта потоков для выбранного участка неба (для туманности Андромеды);
- методика расчета спектра ICS фотонов была обобщена на реалистичный анизотропный случай и получена галактическая карта потоков для туманности Андромеды с явной анизотропией;

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**