

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»**

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

Научно-квалификационная работа аспиранта

по направлению подготовки: 03.06.01 «Физика и астрономия»

Научная специальность: 1.3.15 «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий»

**РАСЧЕТ ВОЗМОЖНЫХ ЭФФЕКТОВ СКРЫТОЙ МАССЫ ВСЕЛЕННОЙ В
ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО КОСМИЧЕСКИМ ЛУЧАМ С ПОМОЩЬЮ РАЗЛИЧНЫХ
ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ И ТЕХНОЛОГИЙ**

Выполнила: аспирант гр. А20-111

Шлепкина Е.С.

Научный руководитель

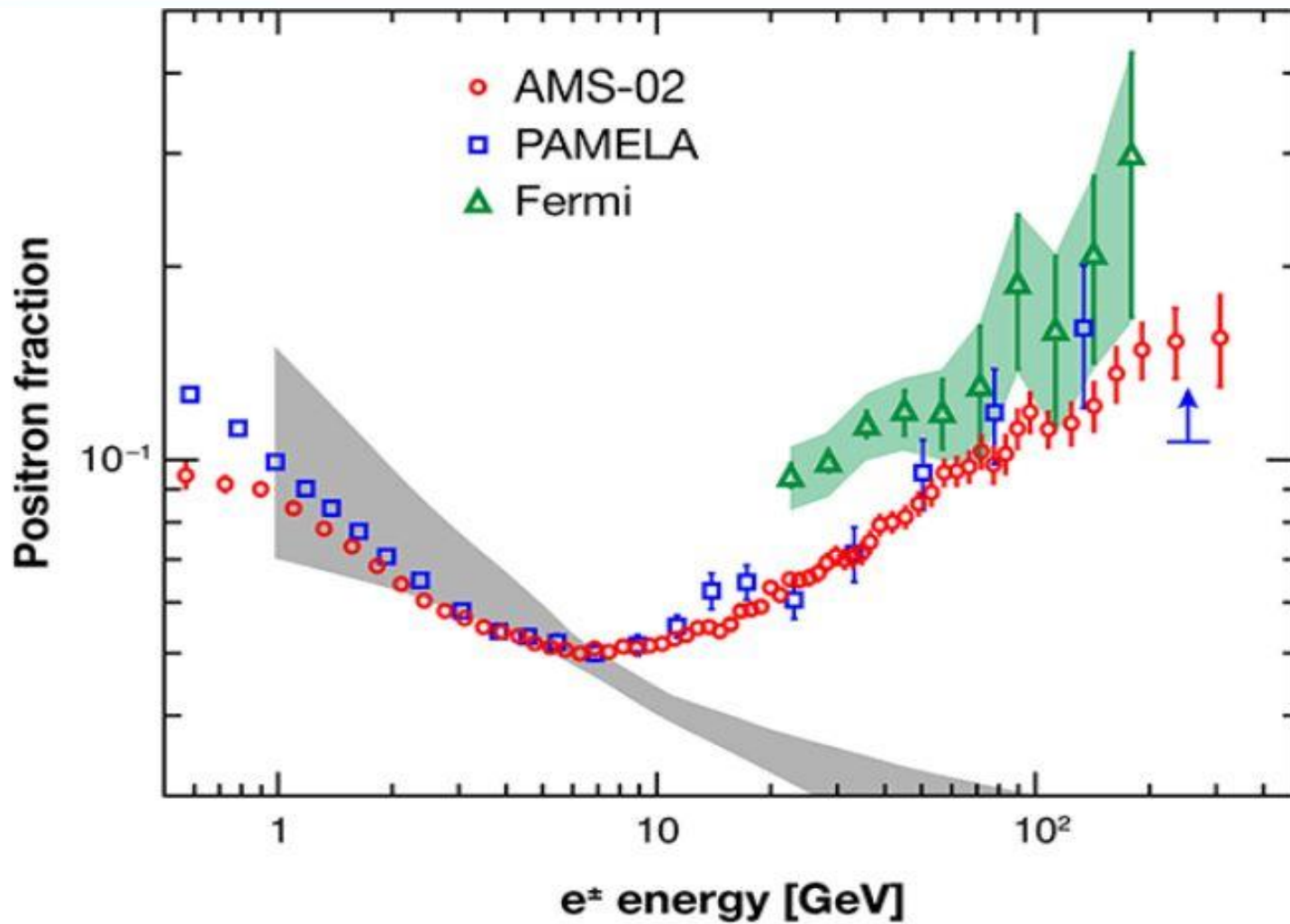
Белоцкий К. М.

Москва, 2024

ВВЕДЕНИЕ

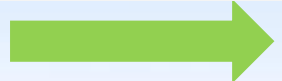
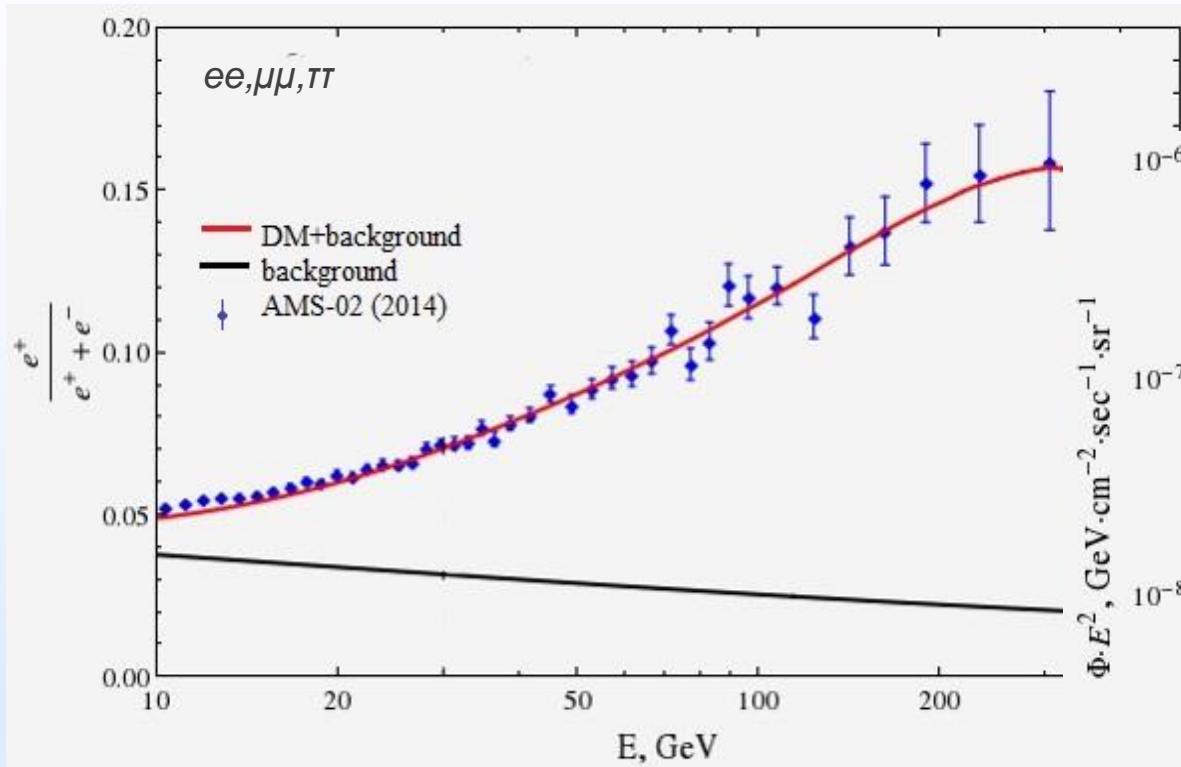
- Рассматриваются различные модели скрытой массы (СМ): в виде частиц небарионной природы и в виде кластеров первичных черных дыр (ПЧД).
- Проблема происхождения позитронной аномалии в космических лучах («Эффект «ПАМЕЛЫ») и ее объяснение с помощью распада или аннигиляции частиц СМ с позитронами в конечном состоянии.
- Возникновение потоков гамма-излучения за счет Обратного Комптоновского Рассеяния (ICS) фотонов на высокоэнергетичных лептонах => возможная угловая анизотропия в гамма-излучении от источника М31
- Скрытая масса в виде кластеров ПЧД. Пересмотр результатов эксперимента МАСНО по поиску событий микролинзирования

ПОЗИТРОННАЯ АНОМАЛИЯ

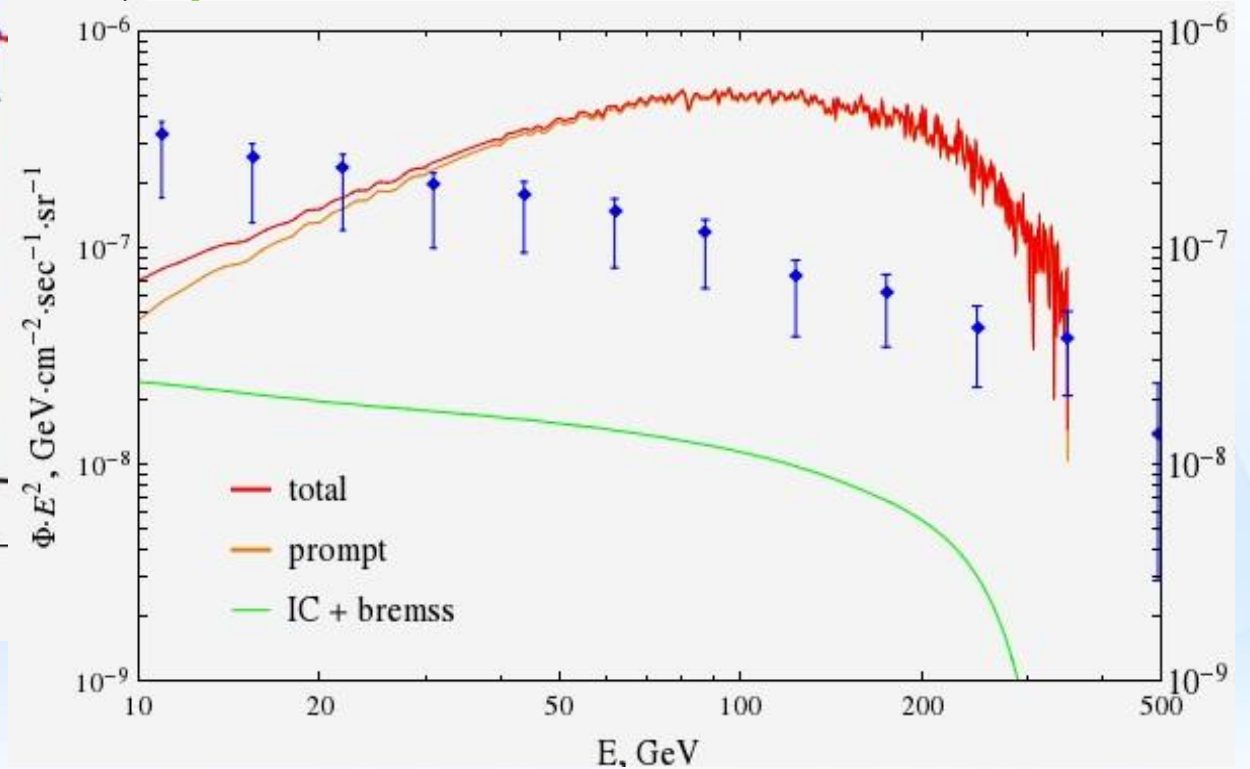


ПРОТИВОРЕЧИЕ С ДАННЫМИ ПО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЮ

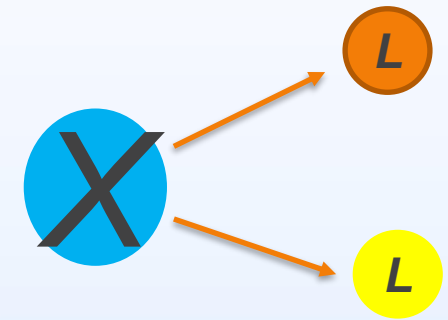
Хорошо согласуется с
данными PAMELA и
AMS-02



Возникают противоречия
с данными Fermi-LAT



ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ЛАГРАНЖИАНА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ



$$\begin{aligned}L_S &= X\bar{\psi}\psi \\L_{ps} &= X\bar{\psi}\gamma^5\psi \\L_V &= \bar{\psi}\gamma^\mu\psi X_\mu \\L_{pv} &= \bar{\psi}\gamma^\mu\gamma^5\psi X_\mu\end{aligned}$$



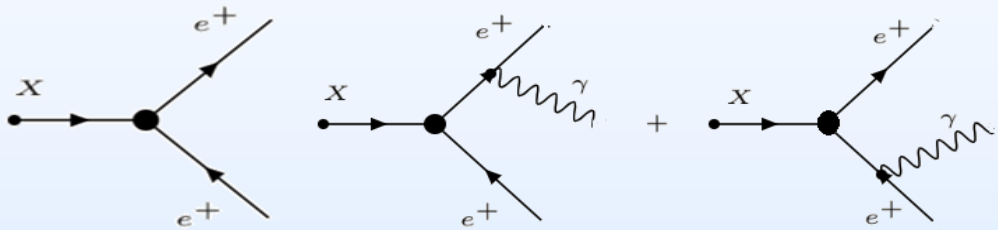
$$\begin{aligned}L_{\text{scalar}} &= X\bar{\psi}(a + b\gamma^5)\psi \\L_{\text{vector}} &= \bar{\psi}\gamma^\mu(a + b\gamma^5)X_\mu\psi\end{aligned}$$

а и b - параметры этой модели, отвечающие за смешивание связей.

- Тогда подавление FSR будет означать что: $\frac{\Gamma(X \rightarrow e^+e^\pm\gamma)}{\Gamma(X \rightarrow e^+e^\pm)} = \min$

МОДЕЛЬ РАСПАДА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Главным образом в данной работе рассматривалась **модель распада** частицы скрытой массы **на два позитрона** ($X \rightarrow e^+e^+$, $X \rightarrow e^+e^+\gamma$)



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

Для скалярной X: **Для векторной X:**

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

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

$$|M|^2 = 4m_x^2(a^2 + b^2)$$

$$|M|^2 = 8m_x^2b^2$$

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

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

$$|M|^2 = 16(a^2 + b^2)$$

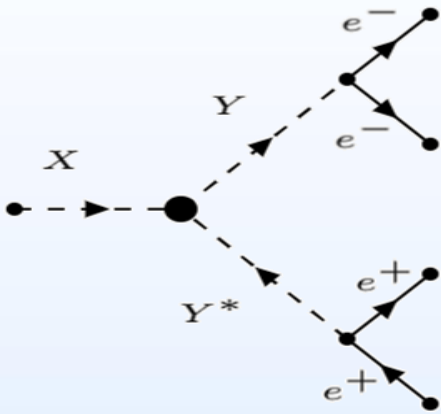
$$|M|^2 = 16b^2 \dots$$

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

Отношение ширин распада этих процессов **не зависит** от параметров a и $b \Rightarrow$ вершина взаимодействия в данном случае не влияет на подавление фотона

МОДЕЛЬ СКРЫТОЙ МАССЫ С ТЯЖЕЛОЙ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТИЦЕЙ

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;

...

1) X, Y – скалярные

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

2) X -векторная Y -скалярная

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

В данном случае также наблюдалось сокращение параметризации

ПОДАВЛЕНИЕ ЗА СЧЕТ ТОЖДЕСТВЕННОСТИ

- Теории «темного атома» (многокомпонентная СМ)

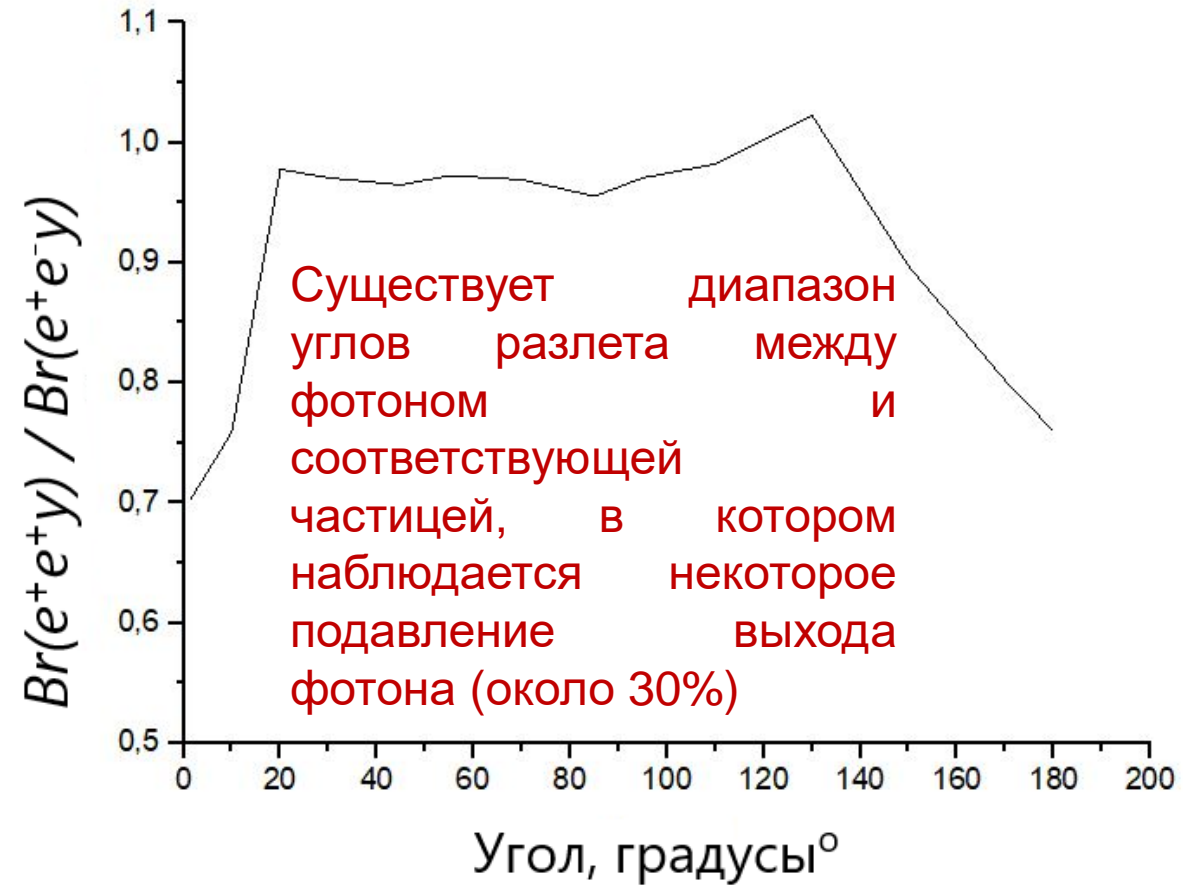
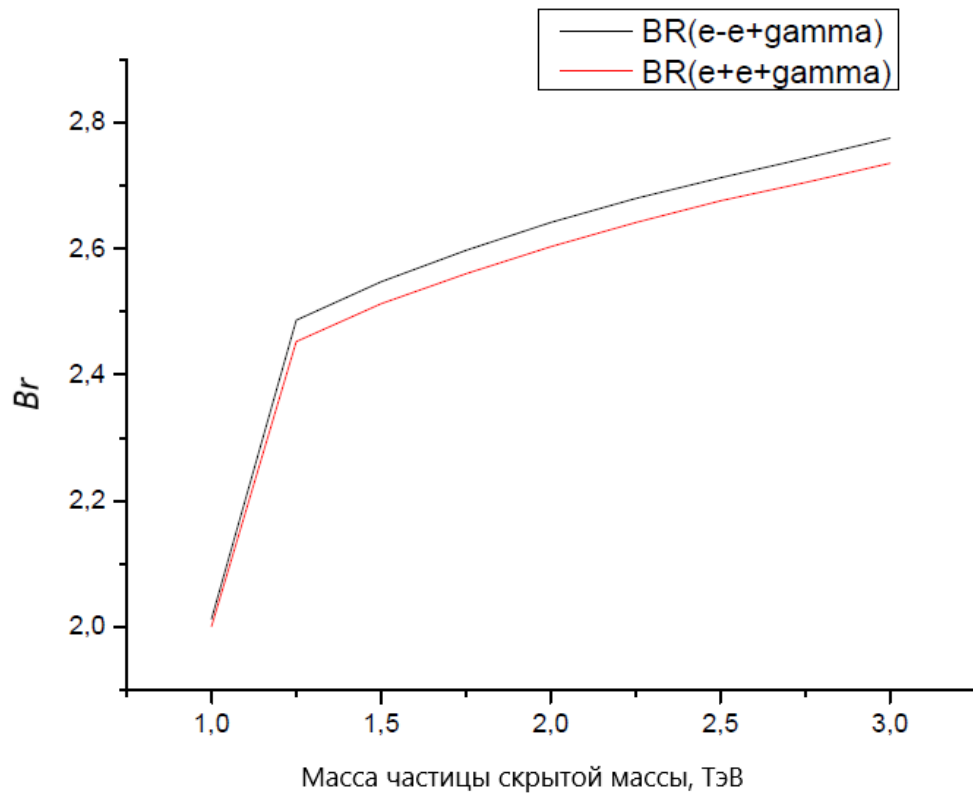
Khlopov, M. Y. Composite dark matter from stable charged constituents

- Принцип соответствия: абсолютное подавление дипольного излучения при испускании системы из двух однозаряженных частиц в классической квантовой физике
- Появление «радиационных нулей» в различных моделях (Однофотонная теорема - релятивистская версия отсутствия электрического дипольного излучения)
- Один фотон на два позитрона

Анализ вклада:

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

ВКЛАД В ЭФФЕКТ ПОДАВЛЕНИЯ ФОТОНА

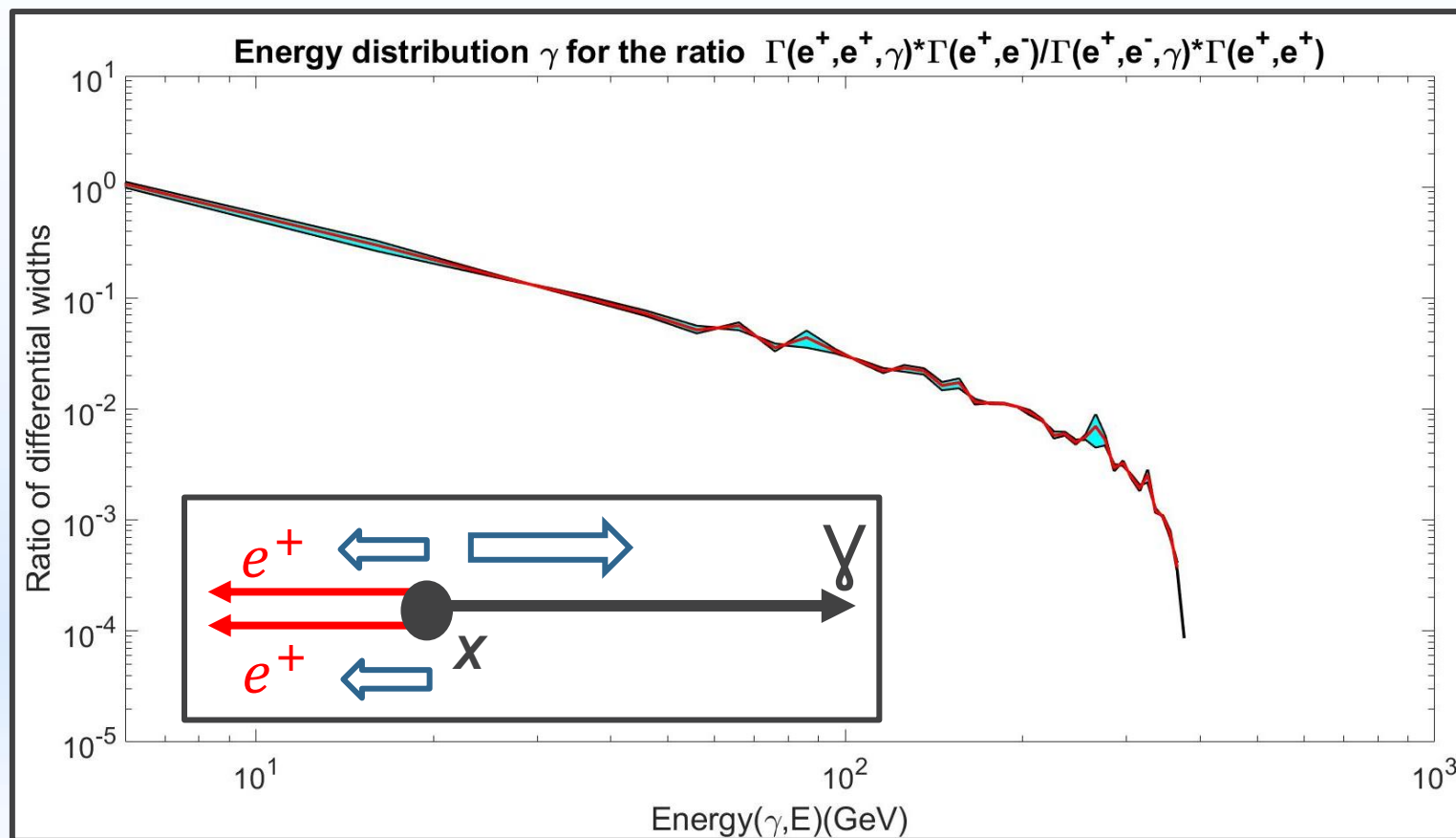


Подавление фотона в энергетическом спектре

- Изучено влияние энергии фотона FSR на подавление

$$\frac{dBr_{e^+e^\pm\gamma}(E)}{dE} \equiv \frac{1}{\Gamma_{e^-e^\pm}} \frac{d\Gamma_{e^-e^\pm\gamma}(E)}{dE}$$

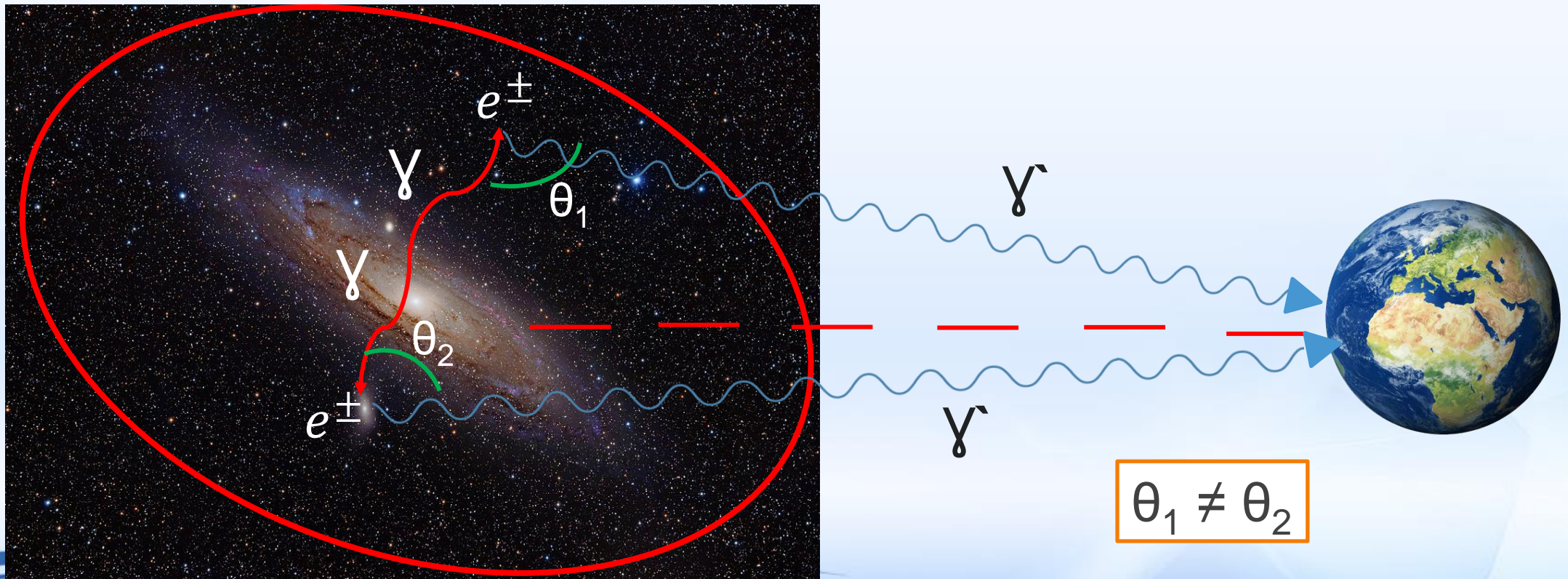
$$R(E) = \frac{dBr_{e^+e^+\gamma}(E)/dE}{dBr_{e^+e^-\gamma}(E)/dE}$$



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

$$\frac{d\Phi}{d\varepsilon_1} = \frac{1}{\varepsilon_1} \frac{\langle \sigma_{ann} v \rangle}{4\pi} r_{\odot} \frac{\rho_0^2}{M_{DM}^2} \bar{J} \Delta\Omega \int_{m_e}^{M_{DM}} dE \frac{\mathcal{P}(\varepsilon_1, E, r)}{\dot{\mathcal{E}}(E, r)} Y(E)$$

Где \bar{J} - геометрический фактор

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

$$Y(E) = \int_E^{M_{DM}} d\tilde{E} \frac{dN}{d\tilde{E}}$$

$\mathcal{P}(\varepsilon_1, E, r)$ - дифференциальная мощность излучения электронов в фотоны

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

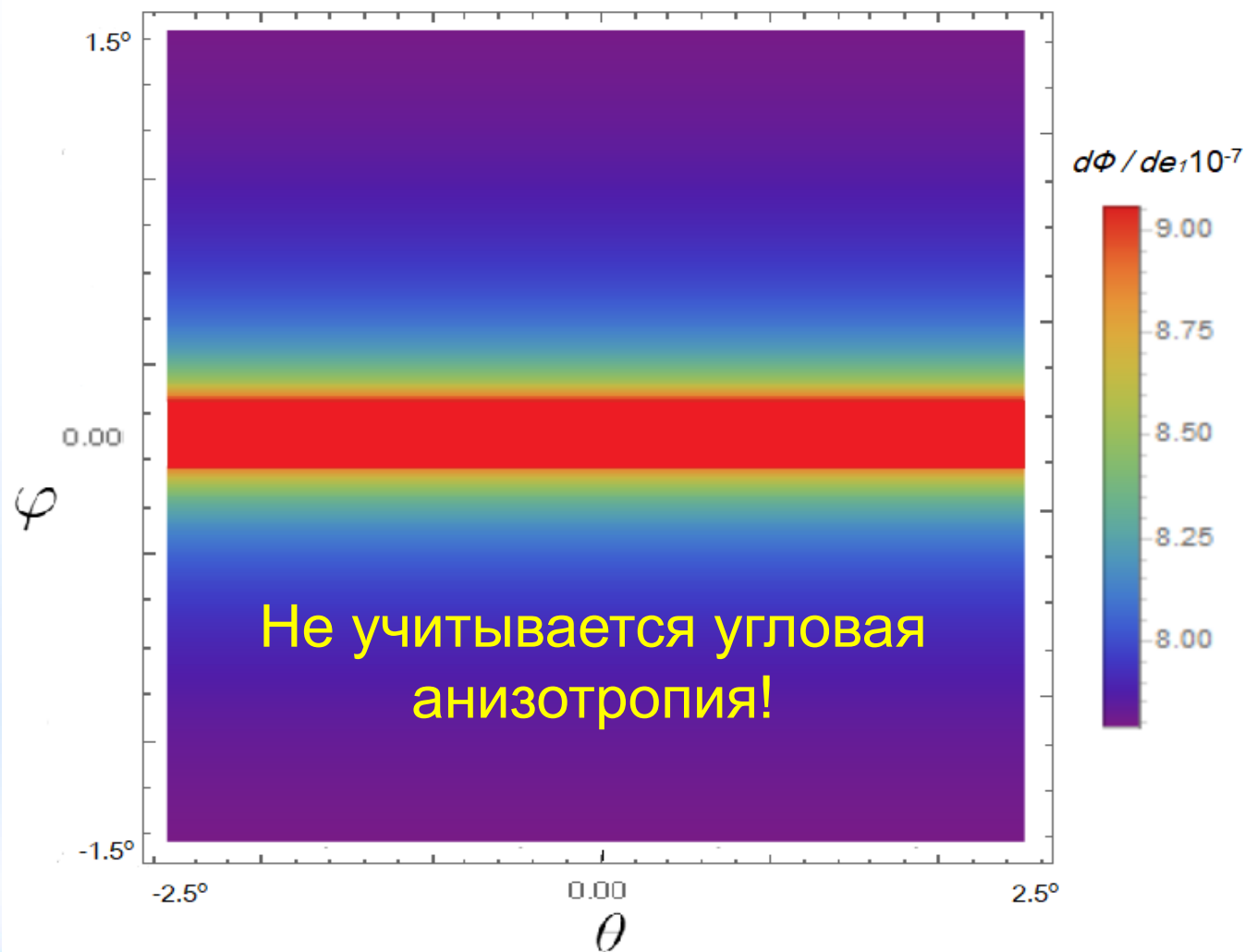
$M_{DM} = 1 - 3$ ТэВ – массы частицы СМ

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

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

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

КАРТА ПОТОКОВ ДЛЯ ИЗОТРОПНОГО СЛУЧАЯ



КАРТА ПОТОКОВ В АНИЗОТРОПНОМ СЛУЧАЕ

$$\frac{d\Phi}{d\varepsilon_1} = \frac{1}{\varepsilon_1} \frac{\langle \sigma_{ann} v \rangle}{4\pi} r_0 \frac{\rho_0^2}{M_{DM}^2} \int_{\Delta\Omega} d\Omega \int_{l.o.s.} \frac{ds}{r_0} \left(\frac{\rho(r)}{\rho_0} \right)^2 \times$$

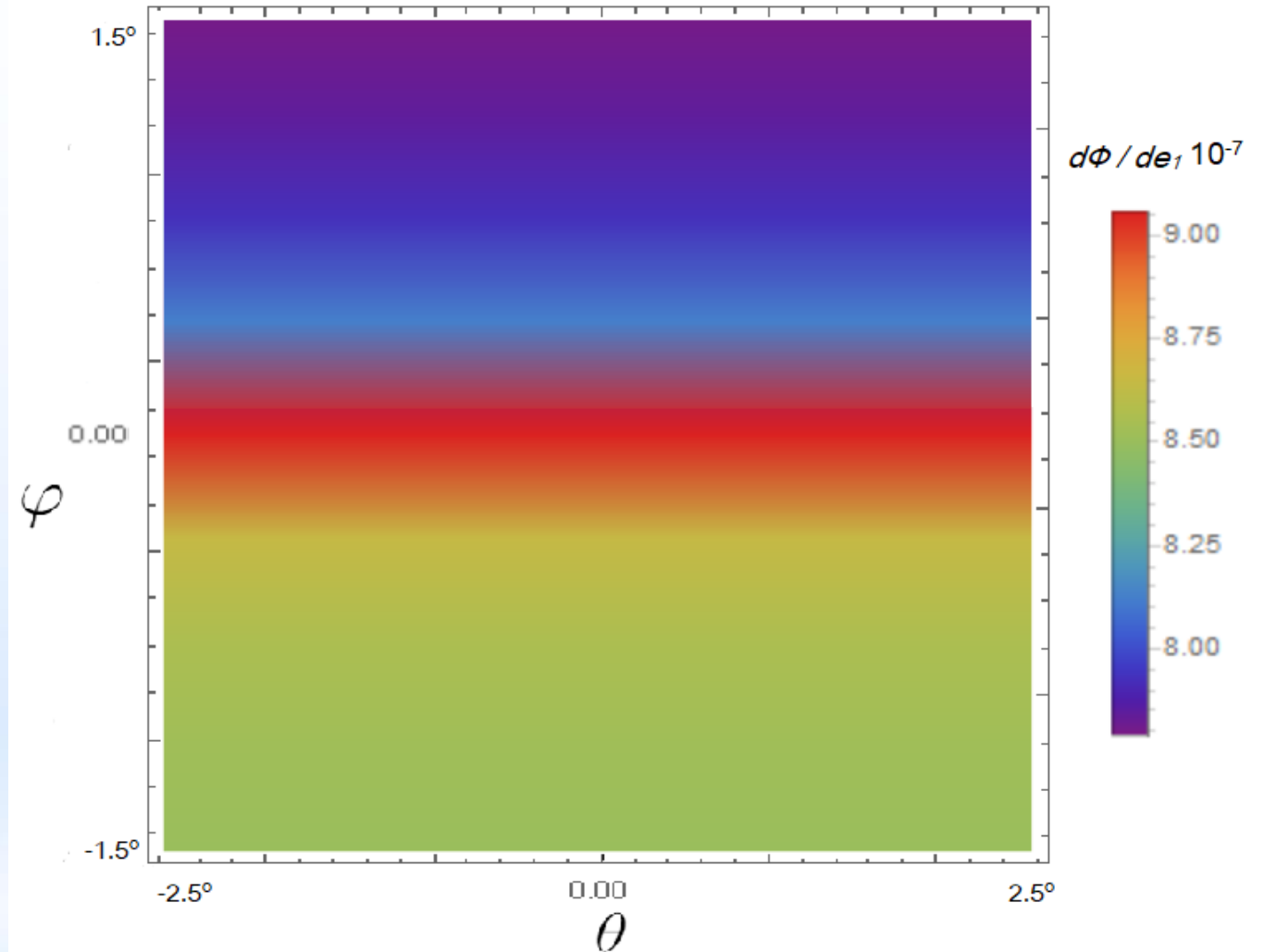
$$\times \int_{\Omega_\gamma} d\Omega_\gamma Q_\gamma(\Omega_\gamma) \int_{m_e}^{M_{DM}} dE \frac{\mathcal{P}(\varepsilon_1, E, r) Y(E)}{\dot{\mathcal{E}}(E, r)}$$

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

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

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

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



ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД

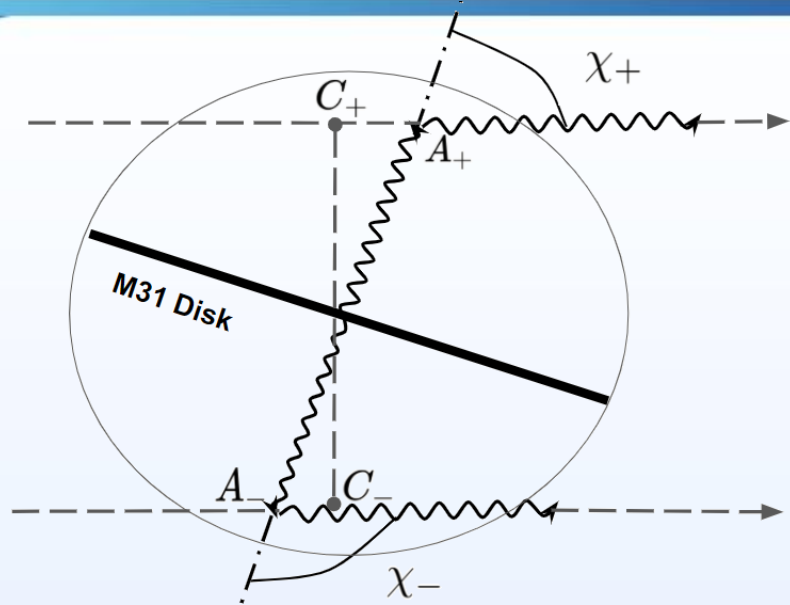
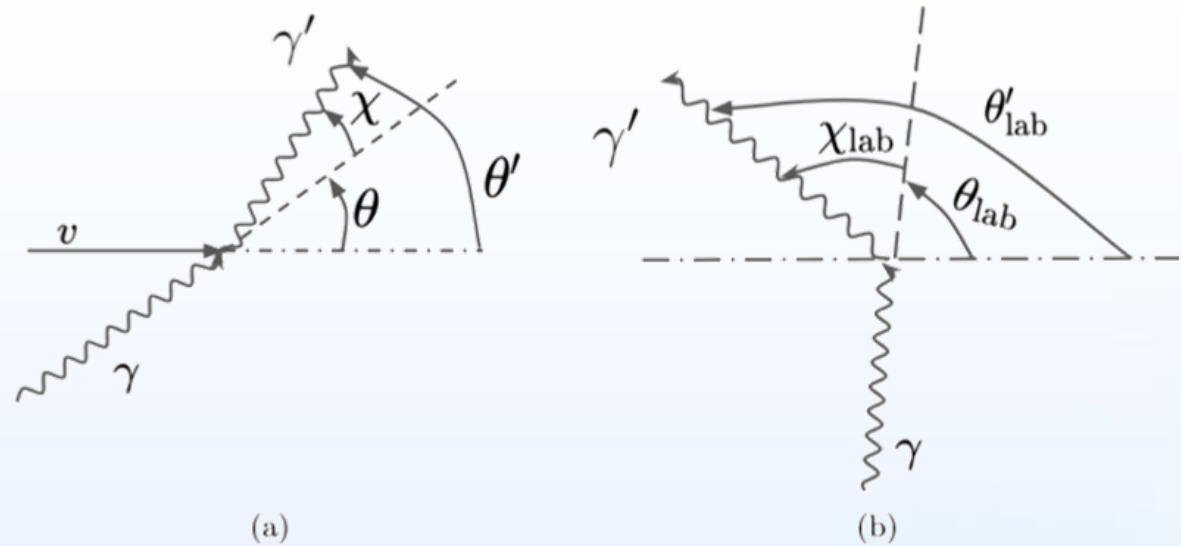


Схема процесса рассеяния в верхней и нижней полусфере гало Андромеды с выбранными точками. Наблюдатель находится справа

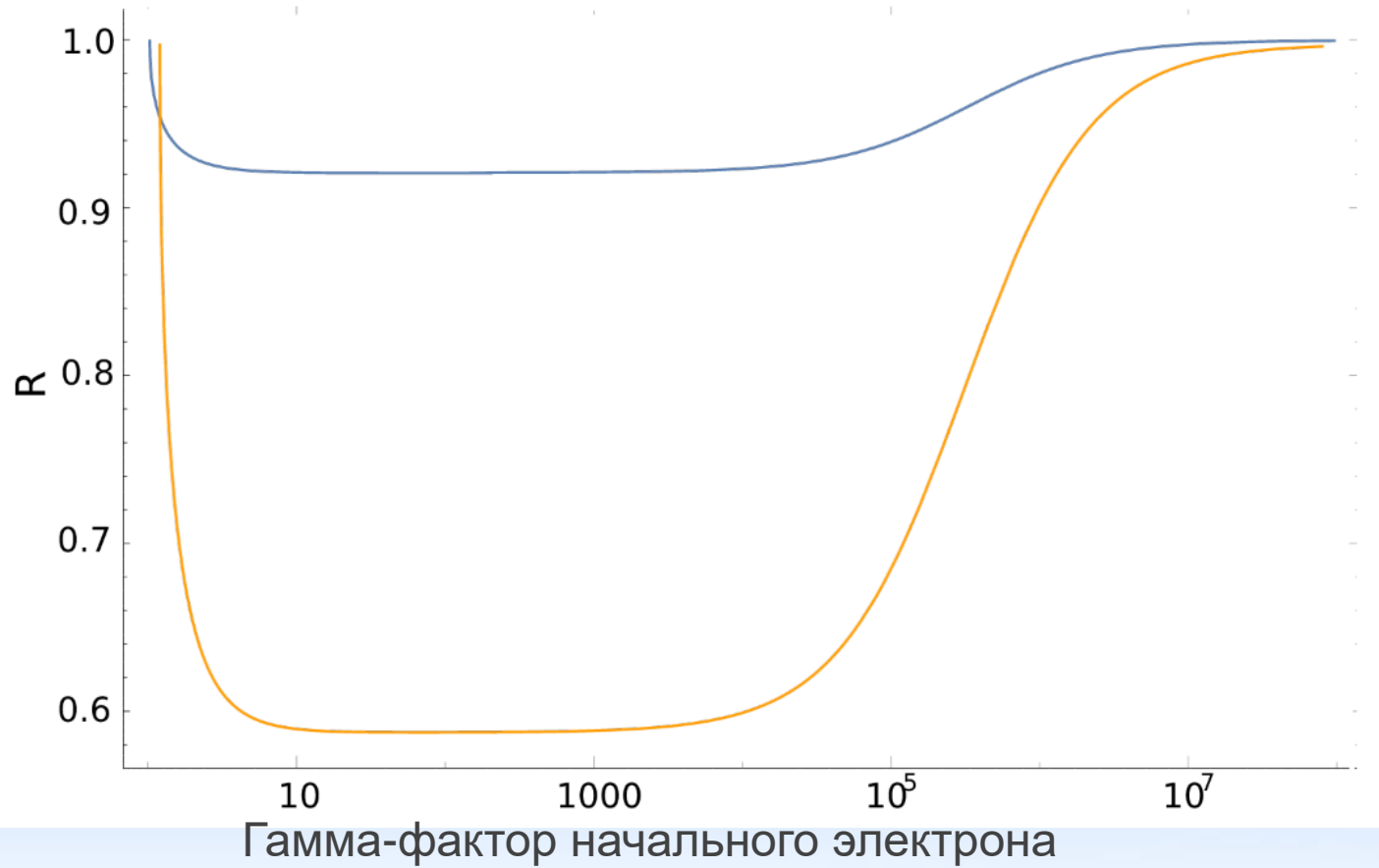


Геометрическая схема вылета фотона в процессе рассеяния на e^\pm . Рассматриваются две системы отсчета: реальная (а) и система покоя электрона (б).

ϵ – Энергия начального фотона
 ϵ' – Энергия рассеявшегося фотона
 m – масса электрона
 γ – Гамма-фактор начального электрона
 v – скорость начального электрона

$$E'_{\max} = \frac{E(1 - v \cos \chi)}{1 - v + \frac{E}{\gamma m}(1 - \cos \chi)} = \frac{(1 + v)\gamma^2 E(1 - v \cos \chi)}{1 + (1 + v)\gamma \frac{E}{m}(-\cos \chi)}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ



$$E'_{max} \sim \begin{cases} \frac{1}{1 + \frac{E}{m}(1 - \cos \chi)} \approx 1 & v = 0 \\ 1 - \cos \chi & 1 \ll \gamma \ll \gamma_{cr} \\ \frac{1 - \cos \chi}{1 - \cos \chi} = 1 & \gamma \gg \gamma_{cr}. \end{cases}$$

$$R = \frac{E'_{max+}}{E'_{max-}} = \frac{1 - \cos \chi_+}{1 - \cos \chi_-} \approx 0.6$$

Расчет геометрическим методом (оранжевая линия) и аналитическим (синяя линия).

**ПОИСК СОБЫТИЙ-КАНДИДАТОВ
МИКРОЛИНЗИРОВАНИЯ НА
КЛАСТЕРАХ ПЧД НА ОСНОВЕ
ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА
МАСНО**

МОТИВАЦИЯ

- ПЧД играют большую роль в нерешенных задачах теоретической физики и космологии (в особенности, описание СМ)
- Микролинзирование звезд Большого Магелланова Облака на кластере ПЧД могло бы проверить данную гипотезу (выделить область допустимых параметров кластера)

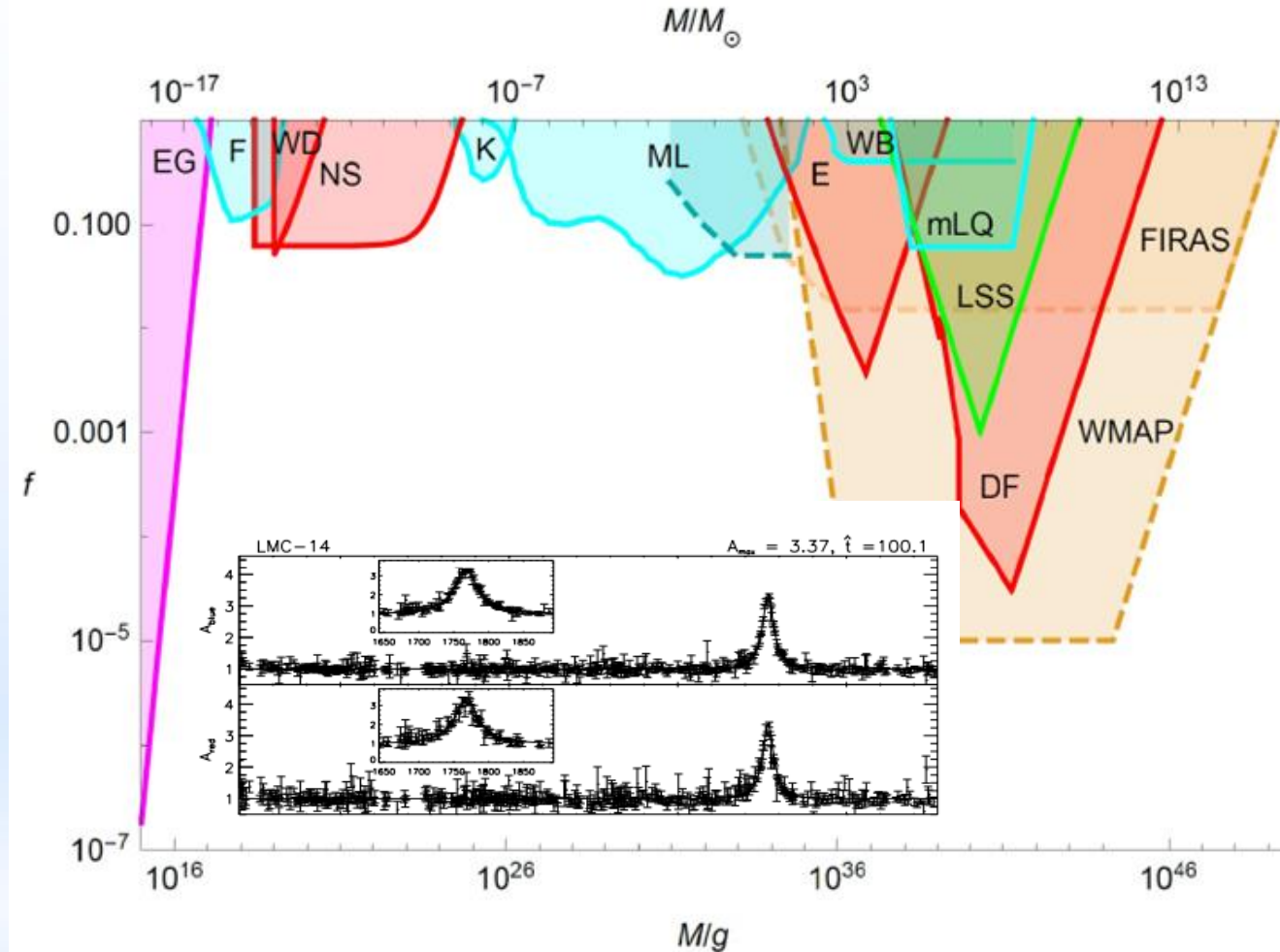
Основная задача

Поиск событий – кандидатов микролинзирования с помощью данных различных экспериментов для дальнейшего анализа, с целью ограничения параметров кластера ПЧД

МИКРОЛИНЗИРОВАНИЕ НА КЛАСТЕРЕ ПЧД

- Микролинзирование – вид гравитационного линзирования, в случае если изображения отдельных объектов не могут быть разрешены с помощью приборов.
- Проявляется как уникальное увеличение блеска источника.
- Событие микролинзирования происходит, когда компактный объект проходит через «трубку» микролинзирования радиус которой ρR_E

$$R_E^2 = r_{\odot} \frac{D_d D_{ds}}{D_s} \frac{m}{M_{\odot}}$$

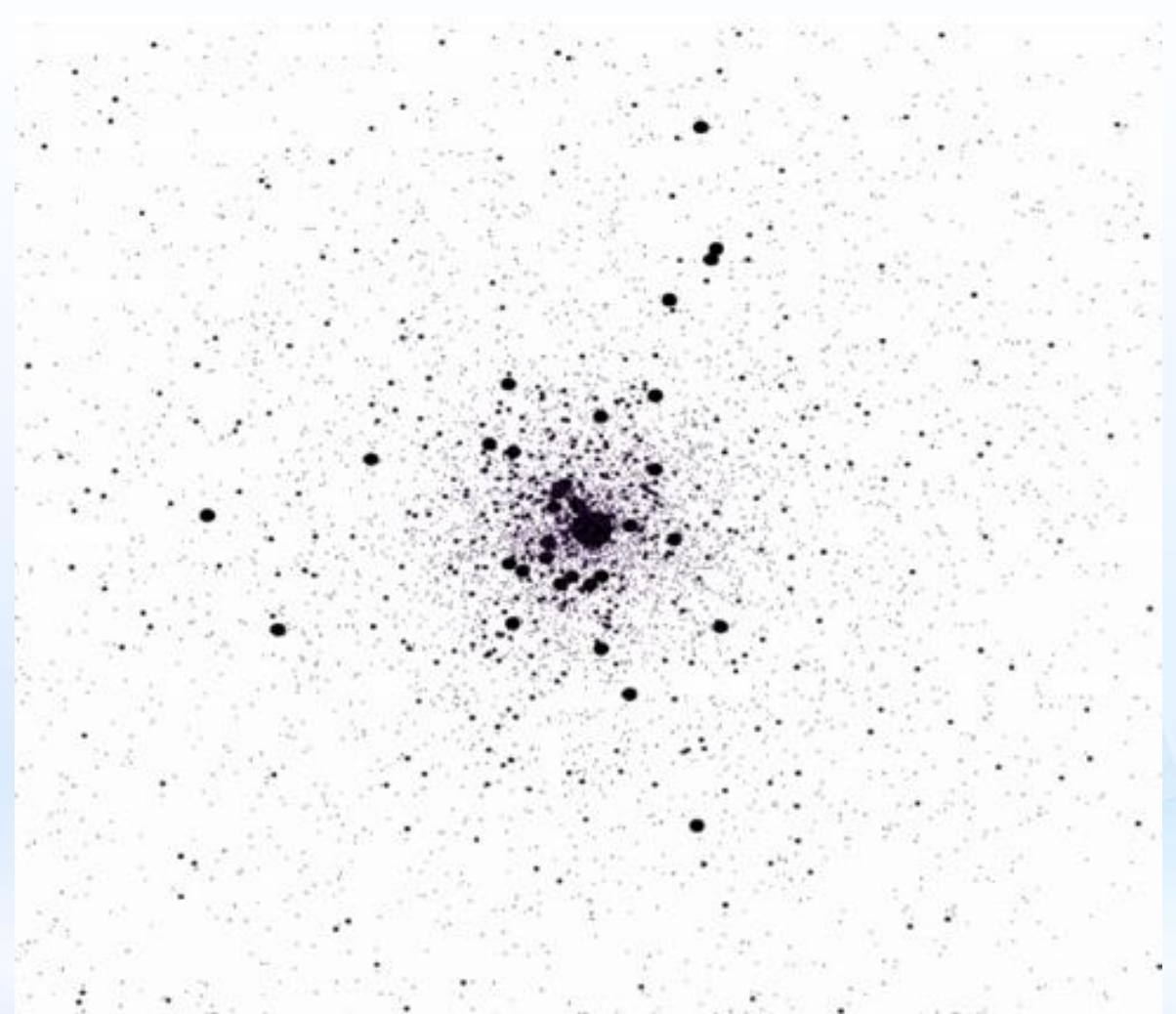


ПАРАМЕТРЫ КЛАСТЕРА

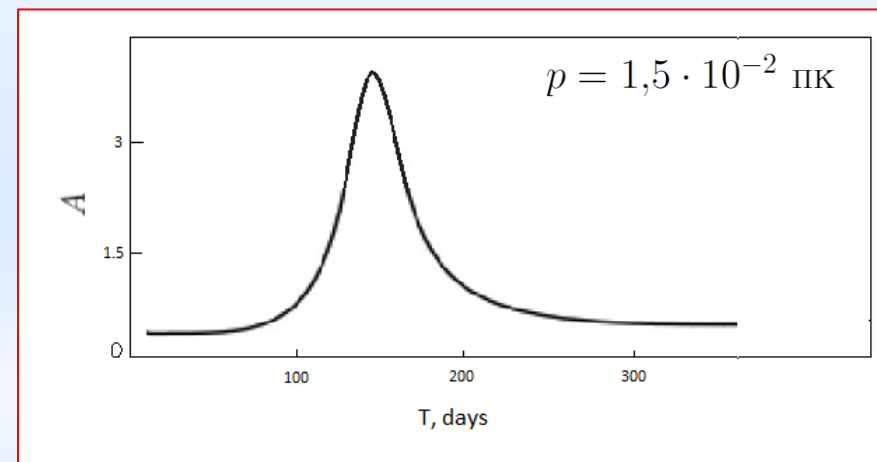
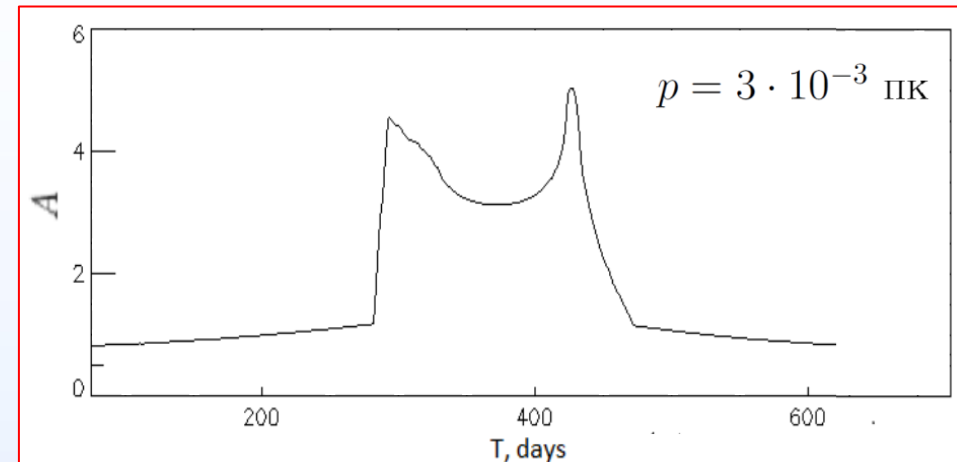
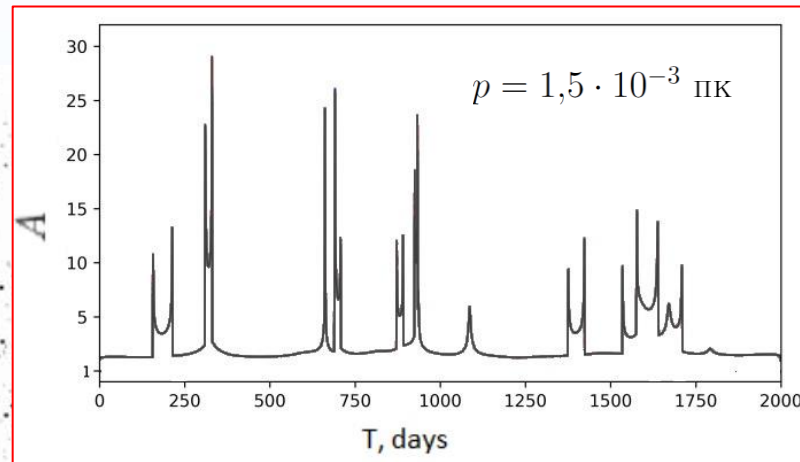
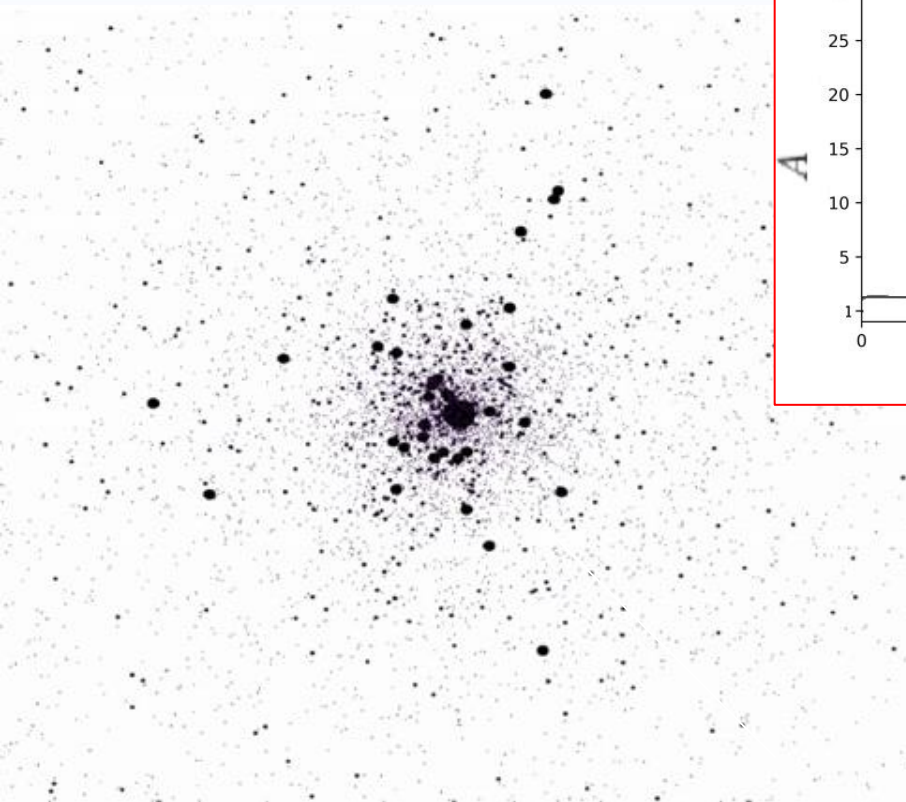
Число ПЧД	10^{13}
Масса Скопления, M_{\odot}	10^5
Диапазон масс ПЧД, M_{\odot}	$10^{-8} - 10^2$
Размер кластера, <u>пк</u>	~ 1
Средний профиль плотности скопления, $\rho(r)$	$\sim r^{-3}$

$$f(m) = m^{\alpha}, \text{ где } \alpha = -1.5$$

Y. Primordial structure of massive black hole clusters/ M. Y.Khlopov, S.G.Rubin, A.S.Sakharov //Astroparticle Physics.— 2005. —Т.23,№2.—С.265—277.



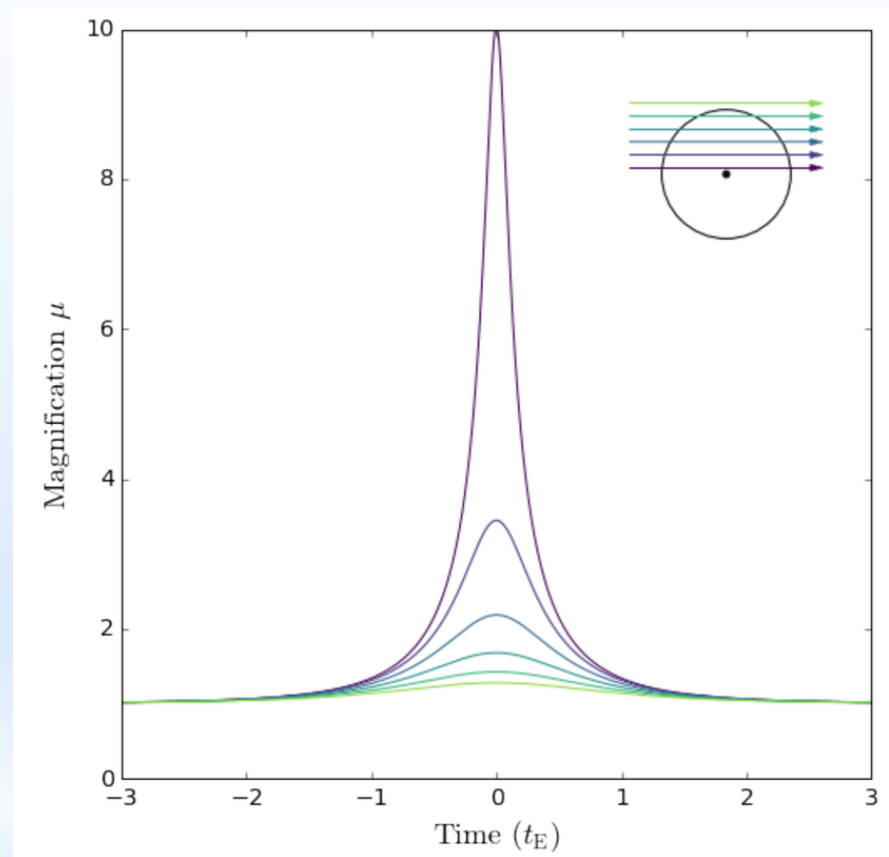
КРИВЫЕ БЛЕСКА В СЛУЧАЕ КЛАСТЕРА



ОТБОР СОБЫТИЙ – КАНДИДАТОВ

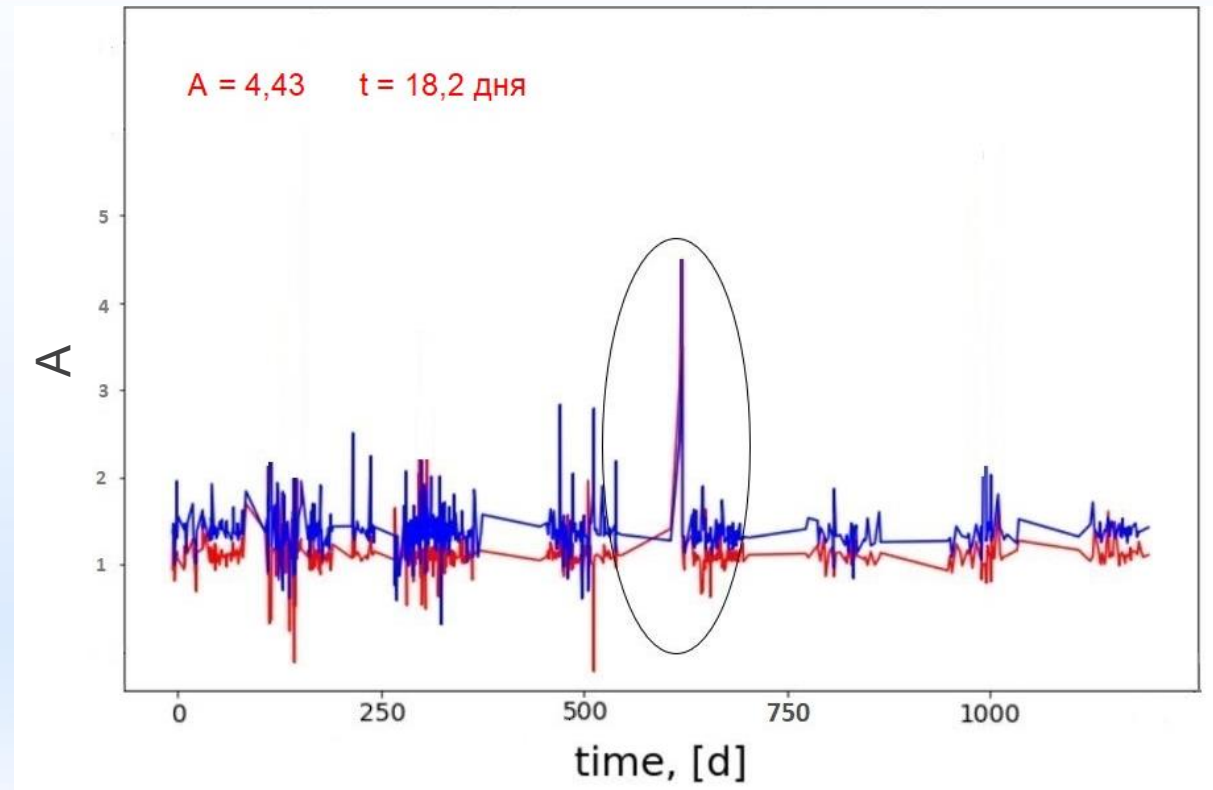
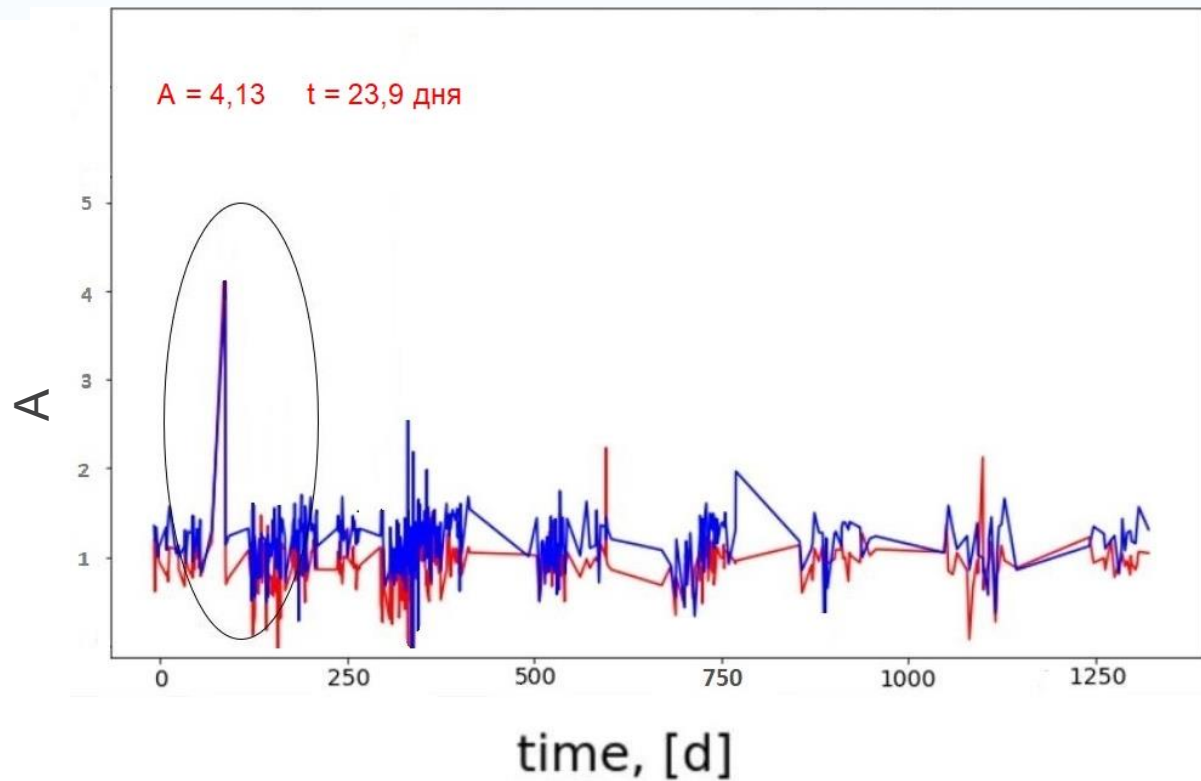
Для выявления возможных событий – кандидатов микролинзирования, был разработан первичный набор критериев, по которым проводился отбор, в зависимости от события:

- Один пик
- Ахроматичность
- Симметричность
- Длительность события: от **нескольких часов** до **300 дней**
- При **любом** коэффициенте усиления

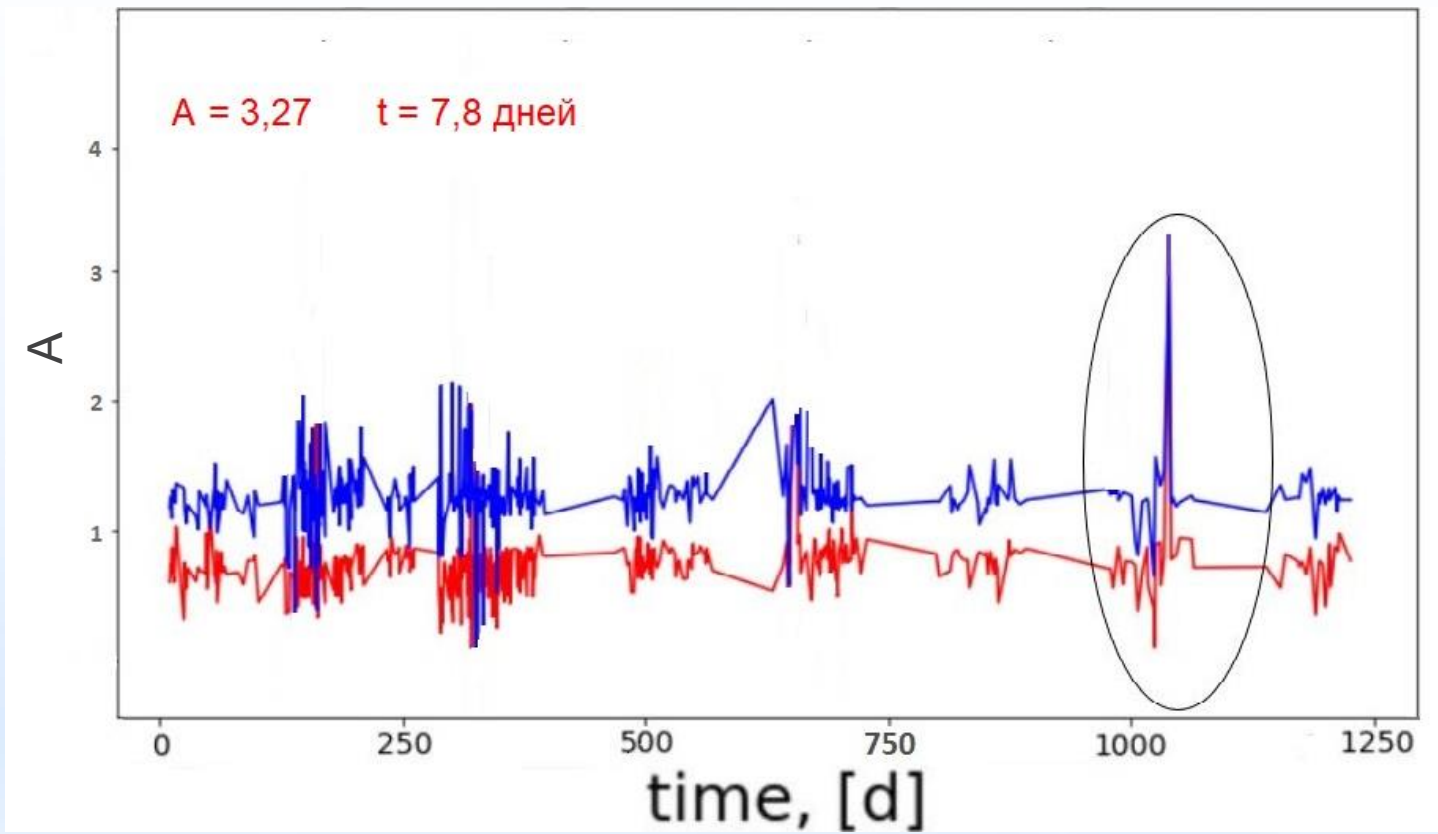


РЕЗУЛЬТАТЫ ОТБОРА

Эксперимент МАСНО, в течение 7 лет функционирования обнаружил 13-17 событий микролинзирования. В дополнение к ним были найдены еще три события



РЕЗУЛЬТАТЫ ОТБОРА

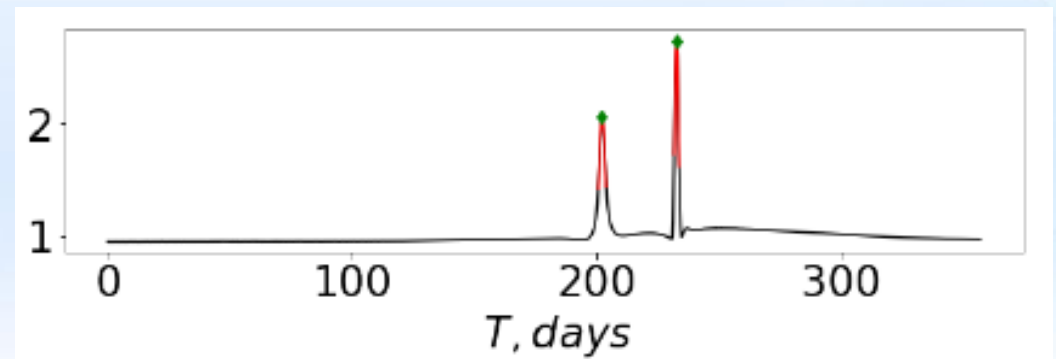
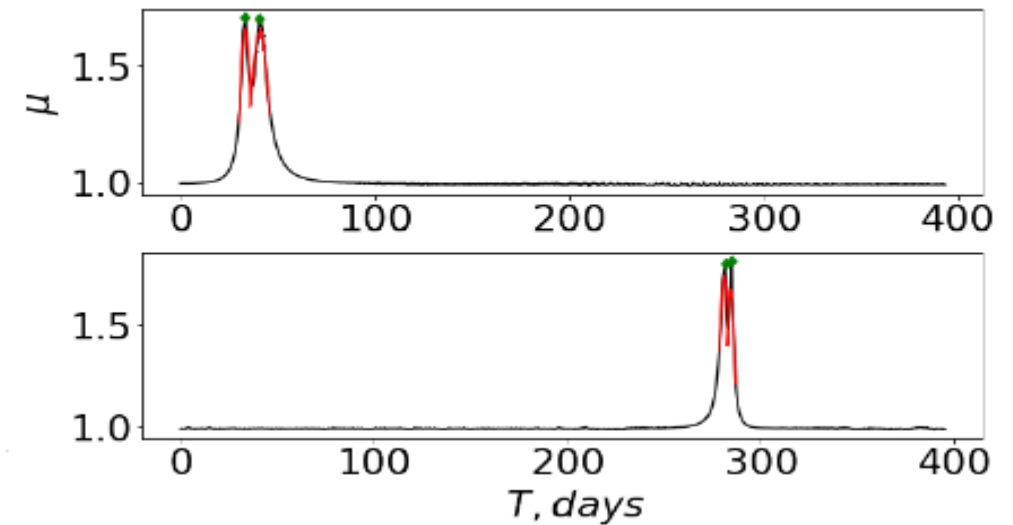


ОТБОР СОБЫТИЙ – КАНДИДАТОВ

Обновленные критерии

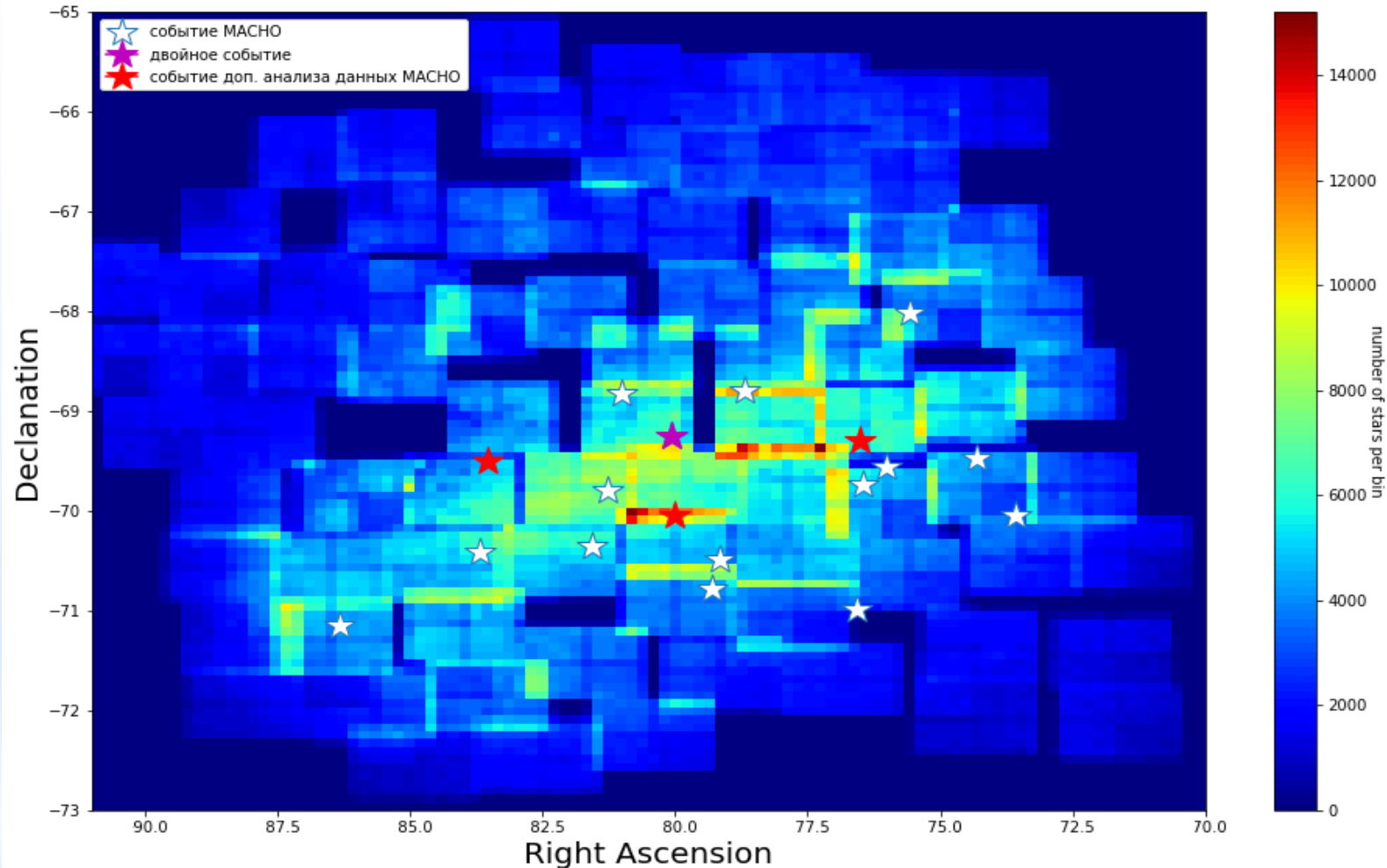
- Два или более пиков
- ~~• Симметричность и ахроматичность~~
- Длительность события: от **нескольких часов** до **300 дней**
- При **любом** коэффициенте усиления

Кривых блеска с двумя (или более) пиками, соответствующих всем поставленным критериям **не обнаружилось.**



КАРТА ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ ЗВЕЗД

- Идея в том, что внутреннее строение кластера, можно проверить с помощью изучения кривых блеска близлежащих к выделенным звездам, которые могли быть микролинзированы.
- Смотрятся корреляции по времени и положению



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам настоящей научно-квалификационной работы:

- Предложены и смоделированы моды распада и аннигиляции частицы SM с тождественными фермионами в конечном состоянии;
- **Были предложены два механизма подавления FSR** и оценен их эффект: (1) параметризация лагранжиана взаимодействия и (2) тождественность частиц в конечном состоянии;
- Рассмотрена задача асимметричного вылета фотонов обратного комптоновского рассеяния за счет геометрических особенностей Туманности Андромеды. Показано, что такая анизотропия существует;
- Проведен поиск событий микролинзирования на кластере ПЧД на фоне звезд Большого Магелланова Облака, с учетом внутреннего строения кластера. Найдены дополнительные события-кандидаты.

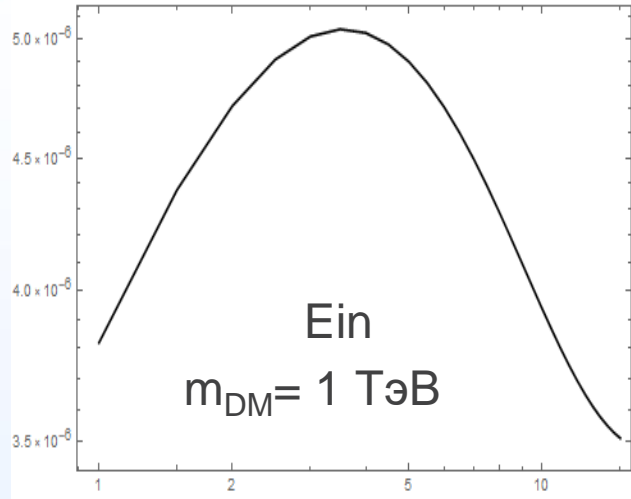
**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**

Актуальность исследования ПЧД

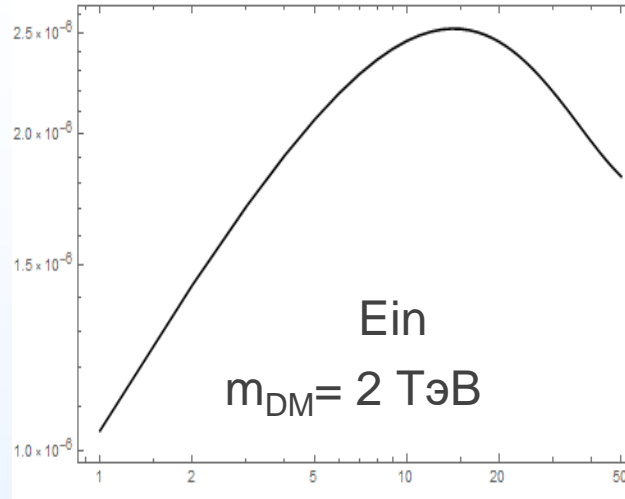
- Теоретически предсказаны
- Недавнее открытие гравитационных волн коллаборацией LIGO интерпретируемое как слияние двойных систем черных дыр с массами порядка $30 M_{\odot}$.
- Происхождение массивных черных дыр в центрах галактик.

СИГНАЛЫ ОТ ICS ФОТОНОВ

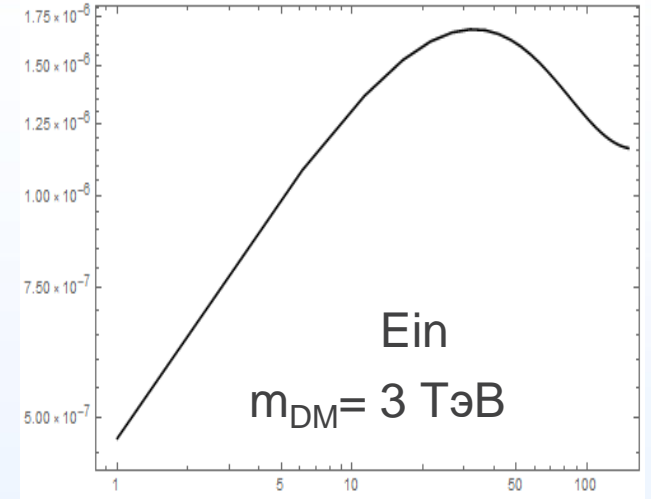
$E^2 d\Phi/dE$ в ГэВ/см² с ср



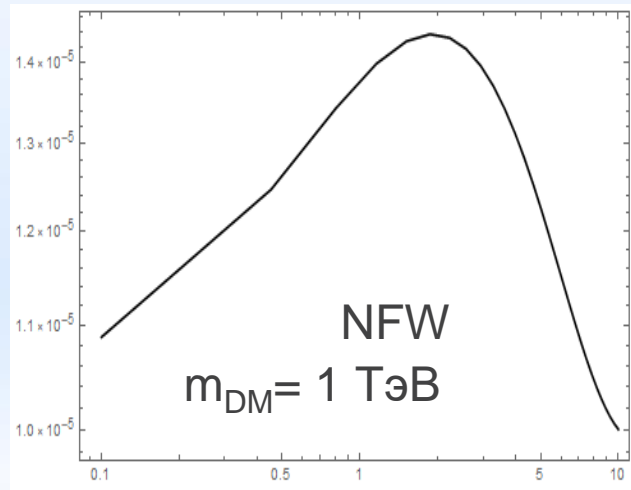
$E^2 d\Phi/dE$ в ГэВ/см² с ср



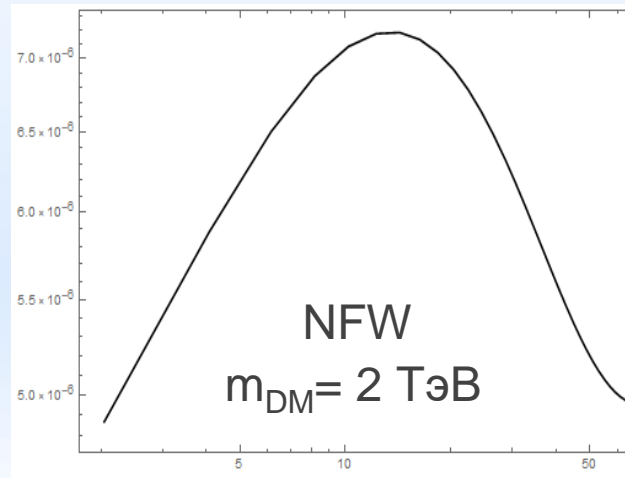
$E^2 d\Phi/dE$ в ГэВ/см² с ср



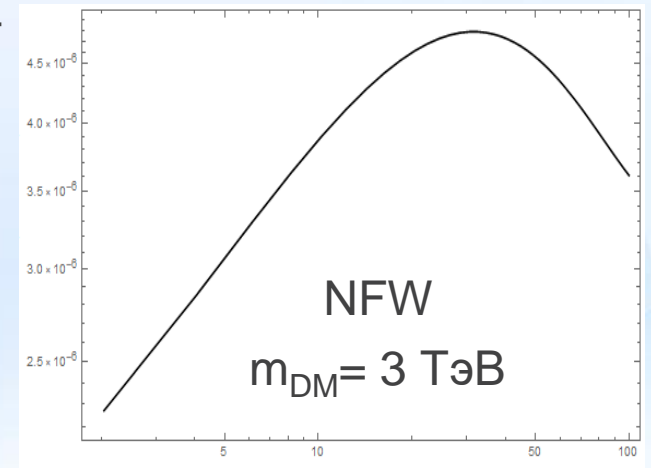
$E^2 d\Phi/dE$ в ГэВ/см² с ср



$E^2 d\Phi/dE$ в ГэВ/см² с ср



$E^2 d\Phi/dE$ в ГэВ/см² с ср

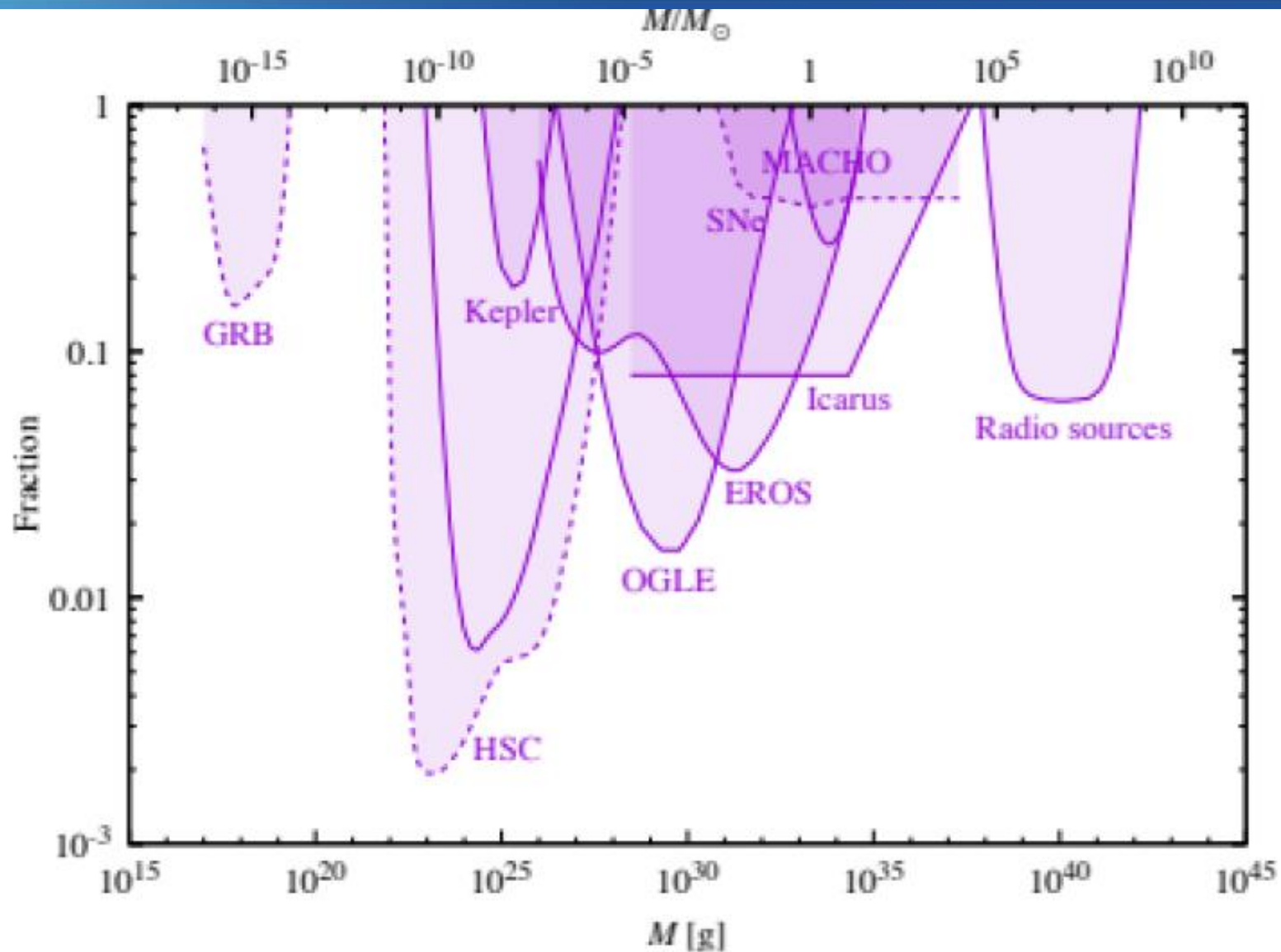


Энергия γ , в ГэВ

Энергия γ , в ГэВ

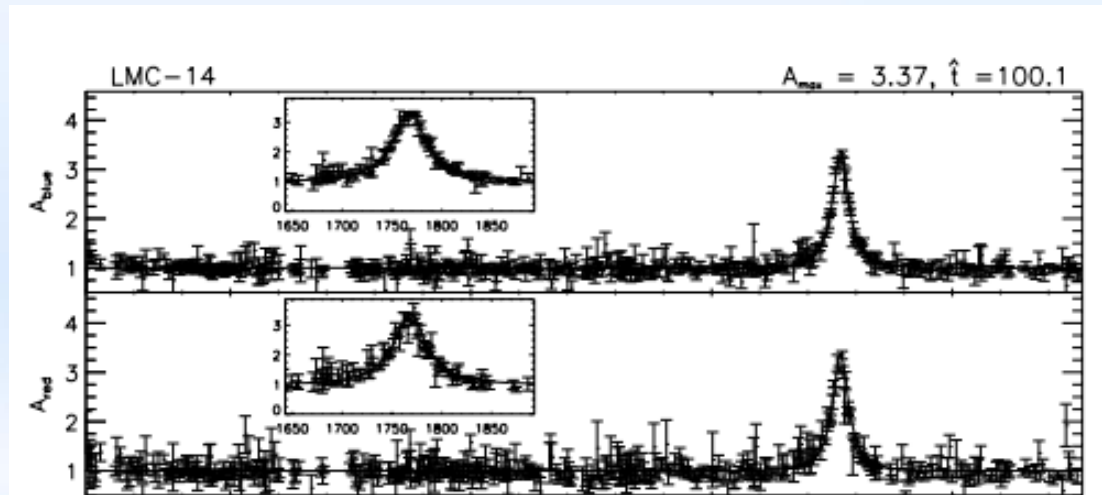
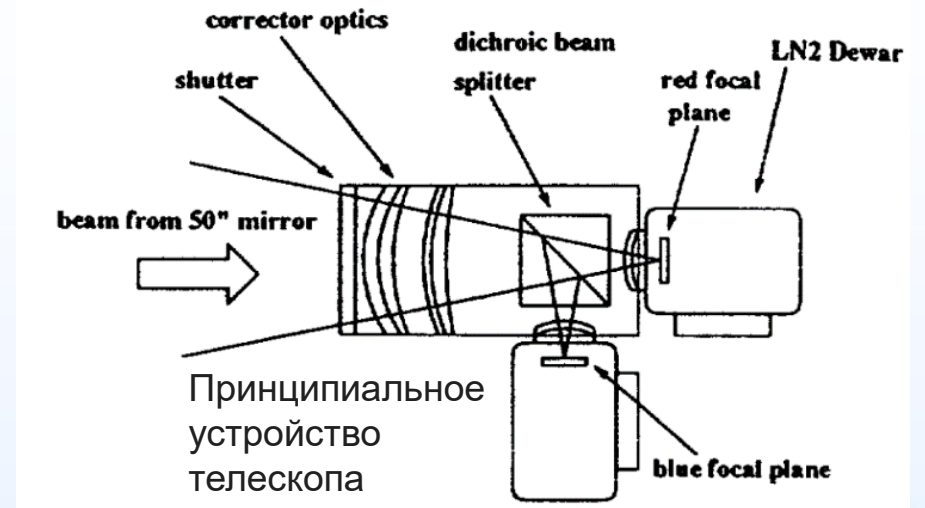
Энергия γ , в ГэВ

ОГРАНИЧЕНИЯ НА МИКРОЛИНЗИРОВАНИЕ



ЭКСПЕРИМЕНТ МАСНО

- 1,27 – метровый Большой Мельбурнский Телескоп
- Наблюдение за звездами БМО, ММО, галактического балджа в двух полосах пропускания
- За время работы наблюдал более 11 миллионов звезд.
- Зафиксировал 13 - 17 событий микролинзирования



Событие микролинзирования зафиксированное в эксперименте

Условия теоремы:

$$M_\gamma = 0,$$

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

Анализ вклада:

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