

Излучение аксионоподобных частиц от сверхновых типа Ia

Давыдов Даниил

Физический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова,
Институт Ядерных Исследований РАН

Сессия-конференция «Физика фундаментальных взаимодействий»,
посвященная 70-летию со дня рождения академика РАН Валерия
Анатольевича Рубакова.

17.02.2025

План

- Основные моменты об аксионноподобных частицах;
- Эффект Примакова в звездах;
- Спектр аксионов от сверхновой типа Ia;
- Формализм Фон Неймана;
- Магнитные поля в Млечном Пути и галактике M82;
- Распространение аксион-фотонной смеси в разных областях;
- Поток фотонов на Земле.

Сверхновые типа Ia образуются в системах двойных звезд, в которой одна из них является белым карликом.

Светимость - 10^{43} erg/sec, на порядки больше солнечной ($\sim 10^{33}$

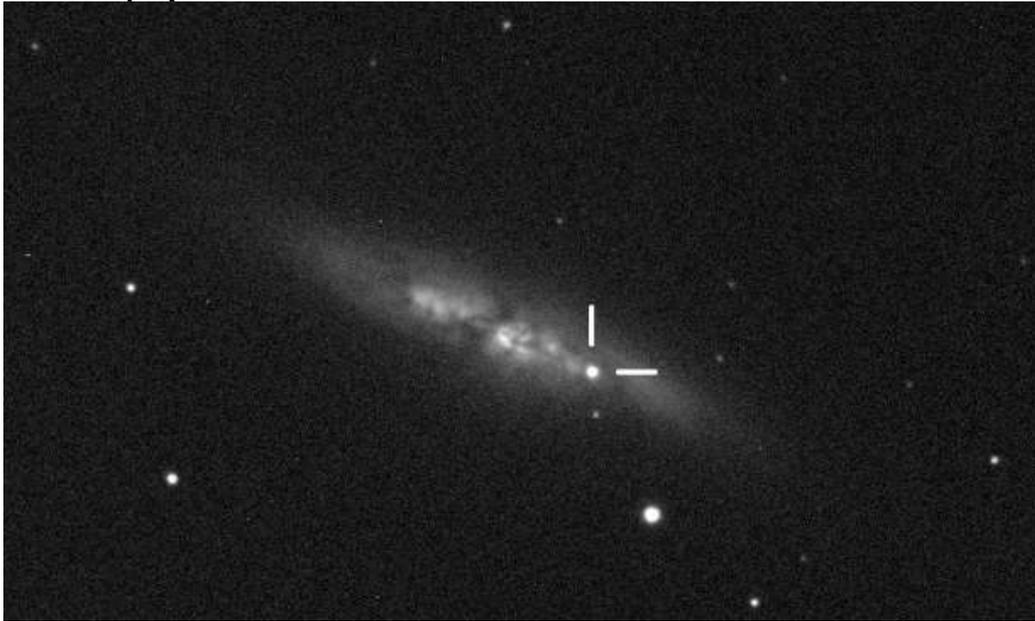


Рис. 1 SN2014J в M82, фото от 22 января 2014.

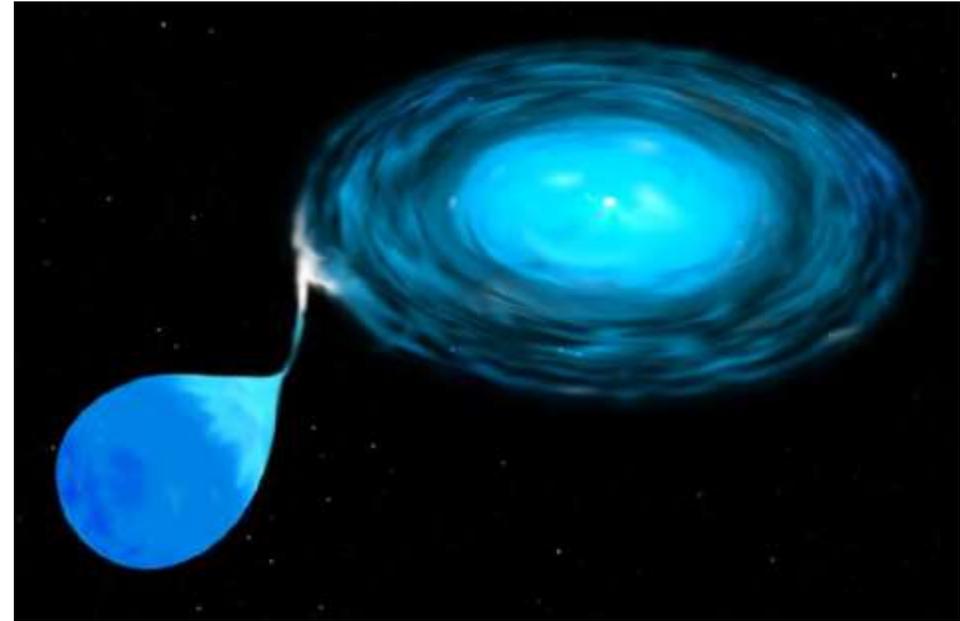


Рис. 2 Формирование аккреционного диска вокруг белого карлика.

Цель работы: вычисление теоретического потока фотонов от сверхновой типа Ia, прилетающих на Землю через аксионноподобные частицы, и последующий их поиск в данных телескопов.

Аксионноподобные частицы **Шаг 1**

Рассмотрим взаимодействие ЭМ поля A_μ и аксионного поля a . Лагранжиан системы:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{1}{2}\left(\partial_\mu a\partial^\mu a - m_a^2 a^2\right) + \frac{1}{4}g_{a\gamma\gamma}aF_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu}$$

где

$$\tilde{F}^{\mu\nu} \equiv \frac{1}{2}\epsilon_{\mu\nu\rho\sigma}F^{\rho\sigma}$$

Последнее слагаемое отвечает за взаимодействие между фотоном и аксионом.

Эффект Примакова как механизм рождения аксионно-подобных частиц

Эффект Примакова – резонансное превращение фотона во внешнем статическом электрическом или магнитном поле в массивную нейтральную псевдоскалярную частицу.

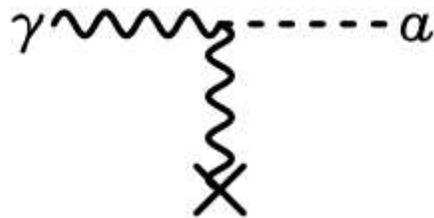


Рис. 3 Превращение между аксионами и фотонами во внешнем электромагнитном поле по эффекту Примакова.

В литературе было получено выражение для скорости перехода фотона с энергией ω в аксион той же энергии:

$$\Gamma_{\gamma \rightarrow a} = \frac{g_{a\gamma}^2 T k_S^2}{32\pi} \left[\left(1 + \frac{k_S^2}{4\omega^2} \right) \ln \left(1 + \frac{4\omega^2}{k_S^2} \right) - 1 \right]$$

где $k_S^2 = \frac{4\pi\alpha}{T} n_B \left(Y_e + \sum_j Z_j^2 Y_j \right)$ фактор, учитывающий эффект экранирования в плазме ($n_B = \rho/m_u$)

Тогда выражение для энерговыделения в единицу объема звезды за счет аксионов есть:

$$Q = \int \frac{2 d^3 \mathbf{k}_\gamma}{(2\pi)^3} \frac{\Gamma_{\gamma \rightarrow a} \omega}{e^{\omega/T} - 1} = \frac{g_{a\gamma}^2 T^7}{4\pi} F(\kappa^2),$$

где $\kappa \equiv k_S/2T$ и

$$F(\kappa^2) = \frac{\kappa^2}{2\pi^2} \int_0^\infty dx \left[(x^2 + \kappa^2) \ln \left(1 + \frac{x^2}{\kappa^2} \right) - x^2 \right] \frac{x}{e^x - 1}$$

с использованием замены переменных $x = \omega/T$.

С другой стороны,

$$Q = \int \frac{dQ}{d\omega} d\omega$$

где в интеграле стоит энерговыделение в единицу объема аксионов с энергией от ω до $\omega + d\omega$. Взяв интеграл от $\frac{dQ}{d\omega}$ по объему, мы получим спектр аксионов от сверхновой:

$$I(t) = \frac{dQ}{d\omega}(t) = \int_0^R \frac{dQ}{d\omega} \left(\frac{M_r}{M}, t \right) 4\pi r^2 dr$$

Модель сверхновой типа Ia

В данной работе мы пользуемся W7 моделью для сверхновых типа Ia.

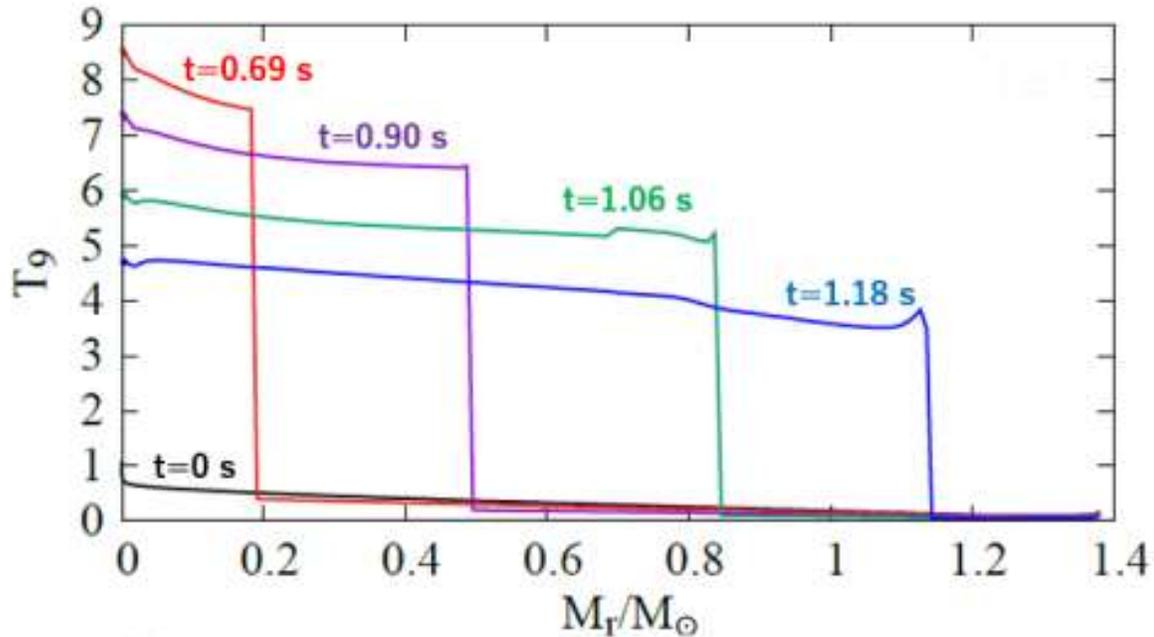


Рис. 4 График зависимости температуры от отношения массы звезды на расстоянии r от центра и Солнца в W7 модели.

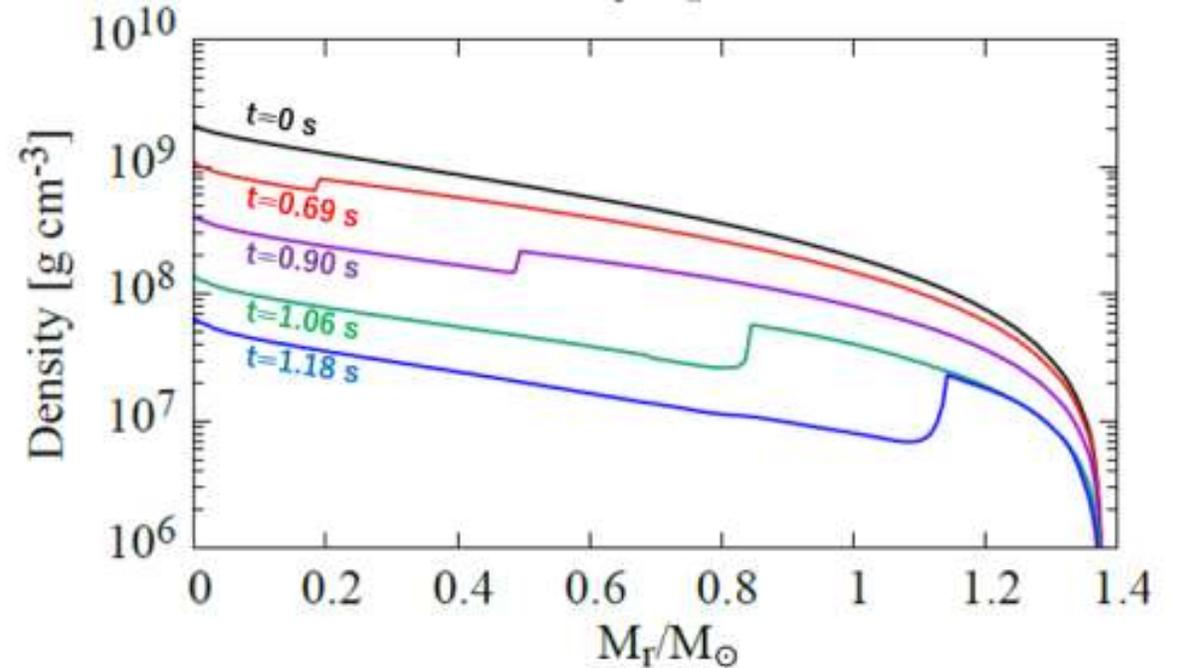


Рис. 5 График зависимости плотности от отношения массы звезды на расстоянии r от центра и Солнца в W7 модели.

Спектр аксионов от сверхновой типа Ia

Мы заинтересованы в спектре аксионов от сверхновой типа Ia как функция времени после взрыва:

$$I(t) = \frac{dQ}{d\omega}(t) = \int_0^R \frac{dQ}{d\omega}\left(\frac{M_r}{M}, t\right) 4\pi r^2 dr$$

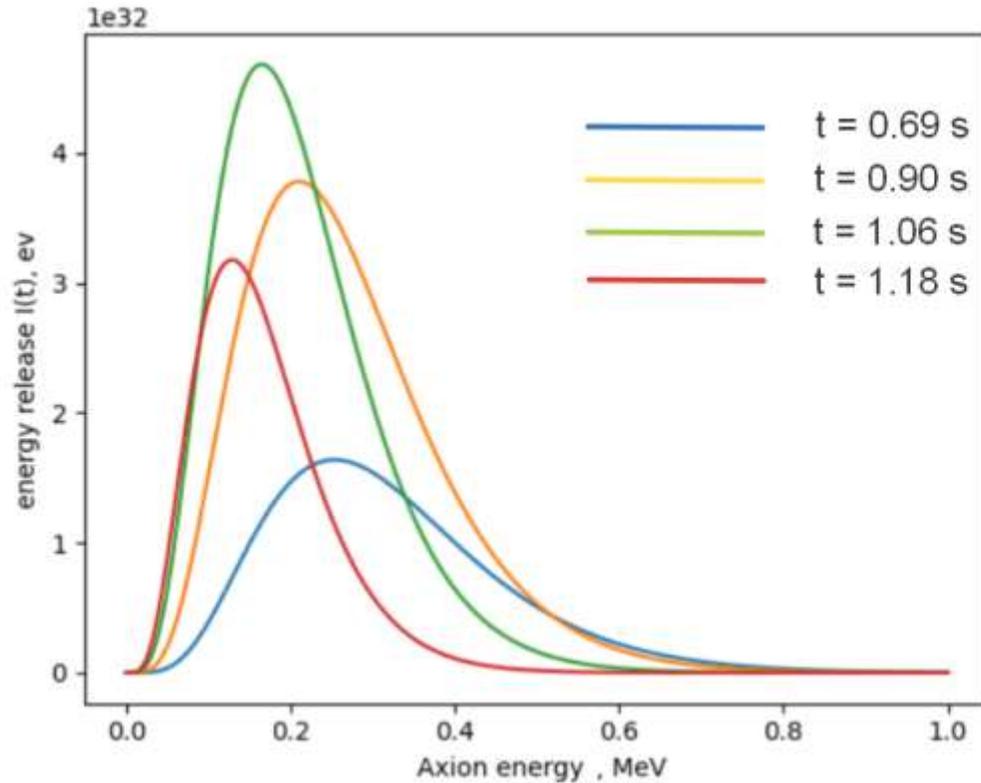


Рис. 6 Спектр аксионов от сверхновой в разные моменты времени после взрыва.

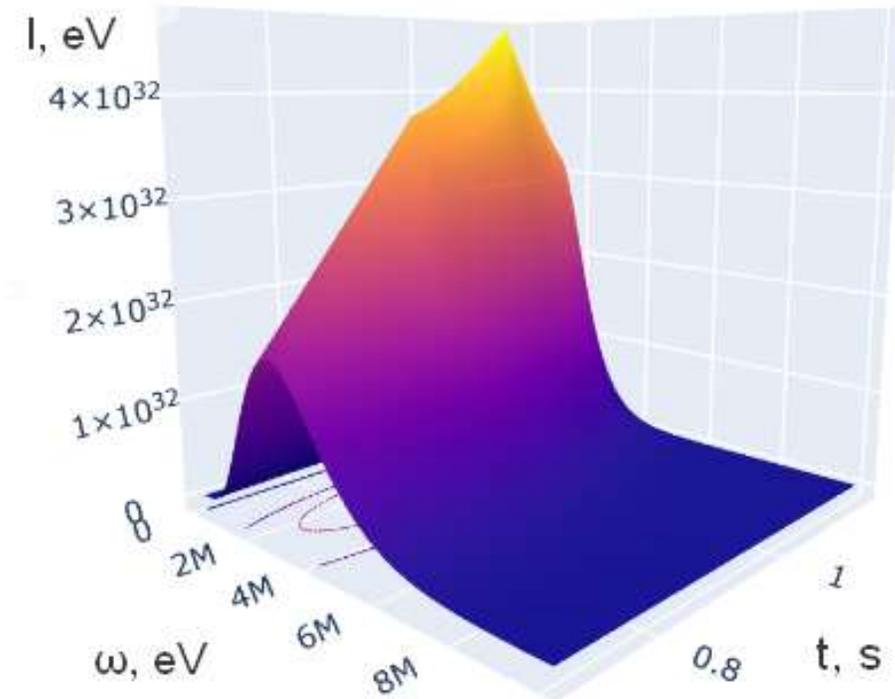


Рис. 7 Спектр аксионов от сверхновой.

В этом формализме матрица плотности подчиняется уравнению Лиувилля:

$$i \frac{d\rho(y)}{dy} = [\rho(y), \mathcal{M}(\omega, y)]$$

Где матрица смешивания выглядит следующим образом:

$$\mathcal{M} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & g_{a\gamma\gamma} B_1 \\ 0 & 0 & g_{a\gamma\gamma} B_2 \\ g_{a\gamma\gamma} B_1 & g_{a\gamma\gamma} B_2 & \frac{m_a^2}{\omega} \end{pmatrix}$$

И компоненты магнитных полей B_1 и B_2 направлены по двум поляризациям фотона.

Для начального состояния:

$$\rho(0) = \text{diag}(0, 0, 1).$$

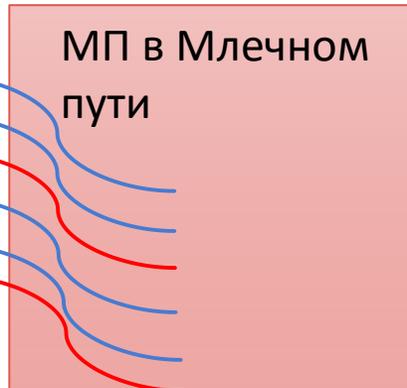
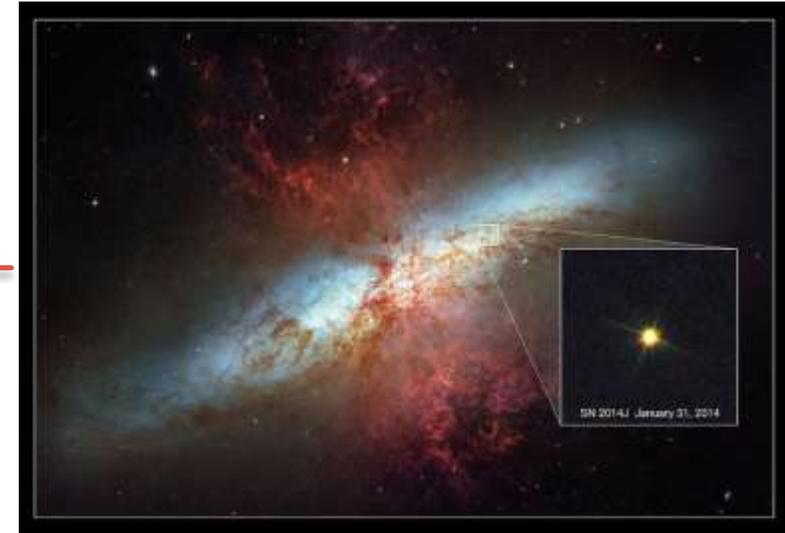
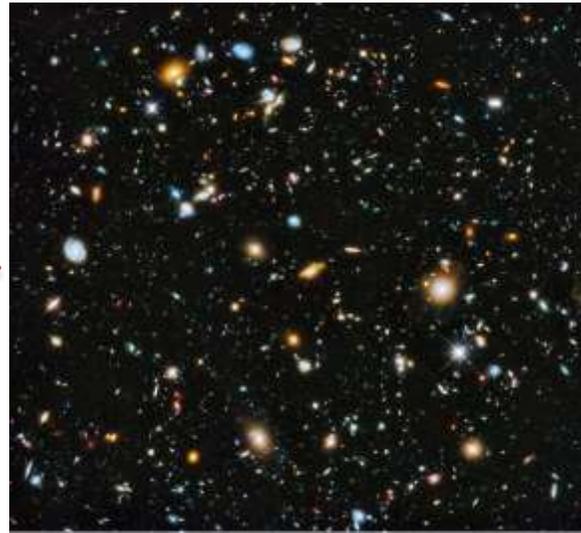
Основная идея

ШАГ 2

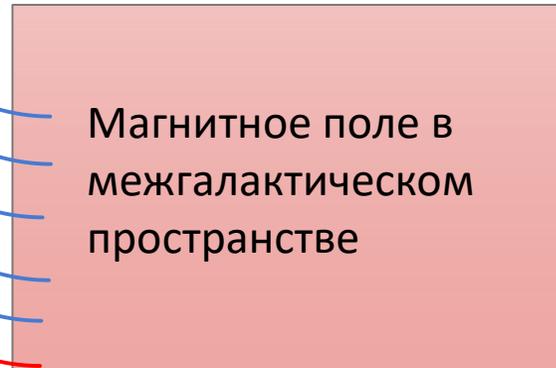
Milky Way

Intergalactic space

Starburst galaxy M82



МП в Млечном пути



Магнитное поле в межгалактическом пространстве



Магнитное поле M82



SN 2014J

Некоторые фотоны могут быть задетектированы

Аксионы + фотоны

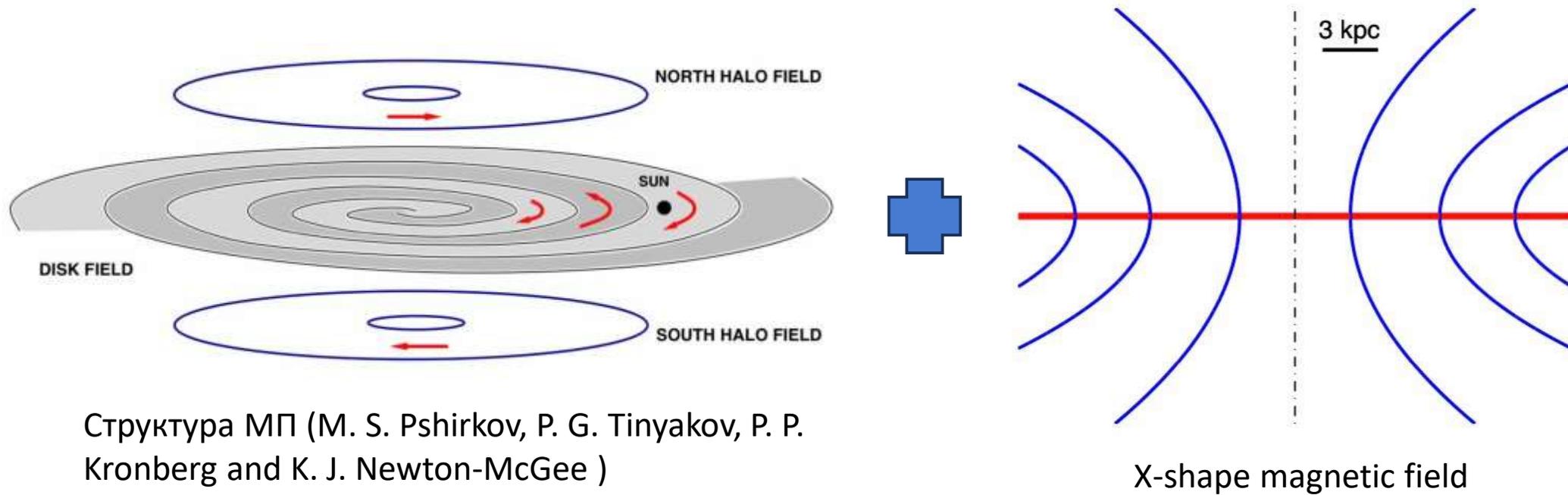
Аксионы + фотоны

Аксионы 10/19

Магнитное поле галактик

ШАГ 2

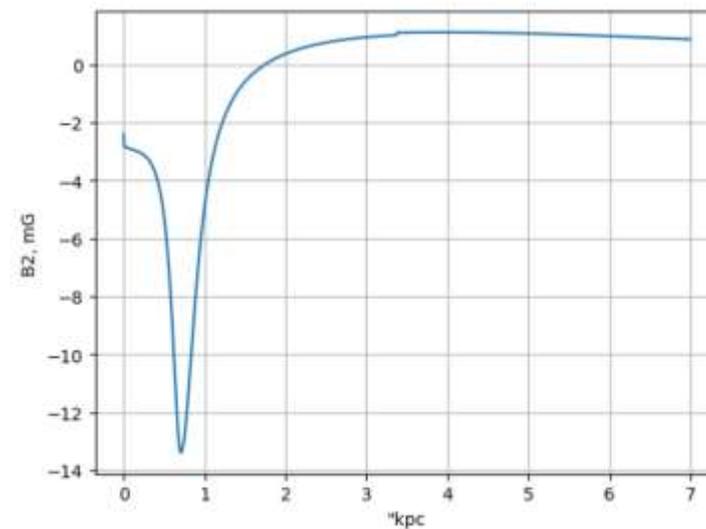
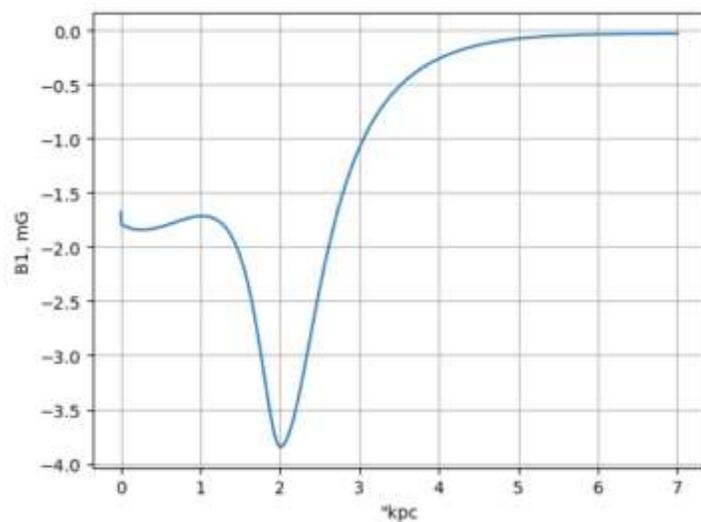
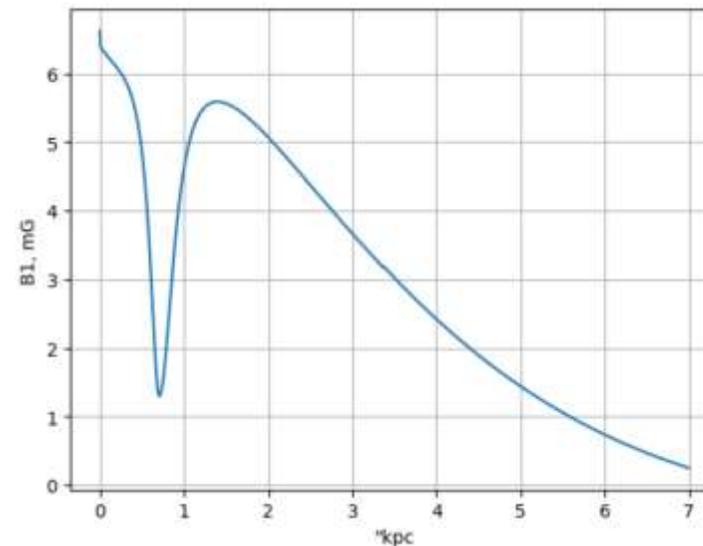
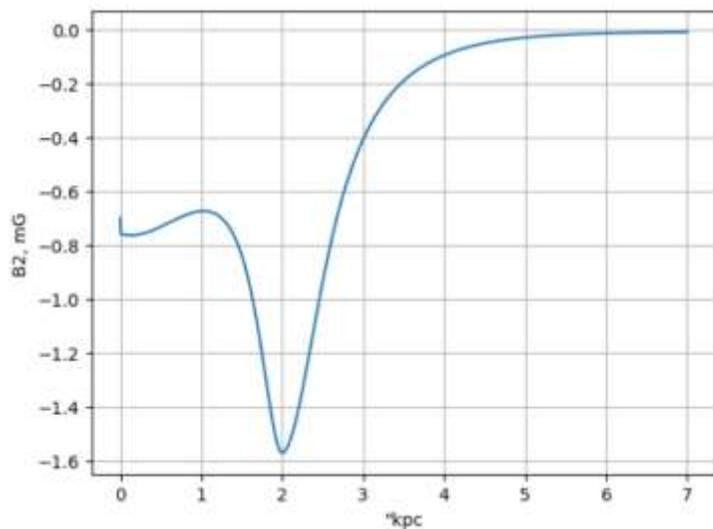
Мы используем модель галактического МП, состоящей из двух компонент (**поле диска и поле гало**) с добавлением в эту модель X-shape компоненты.



Магнитное поле галактик

STEP 2

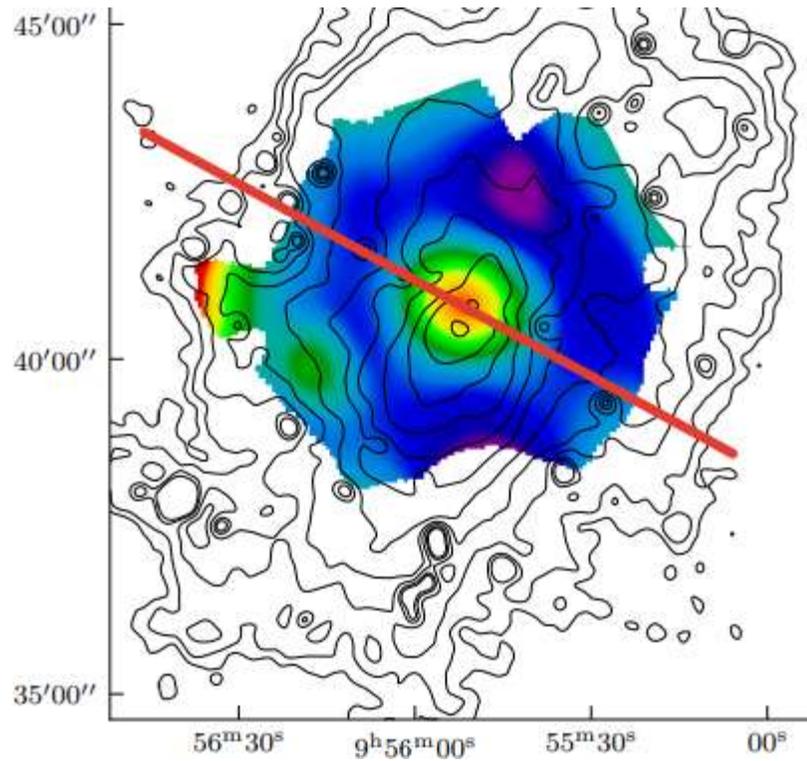
С помощью этой модели мы можем получить компоненты МП, возникающих в матрице смешивания (слева – компонента X-shape отсутствует, справа – присутствует).



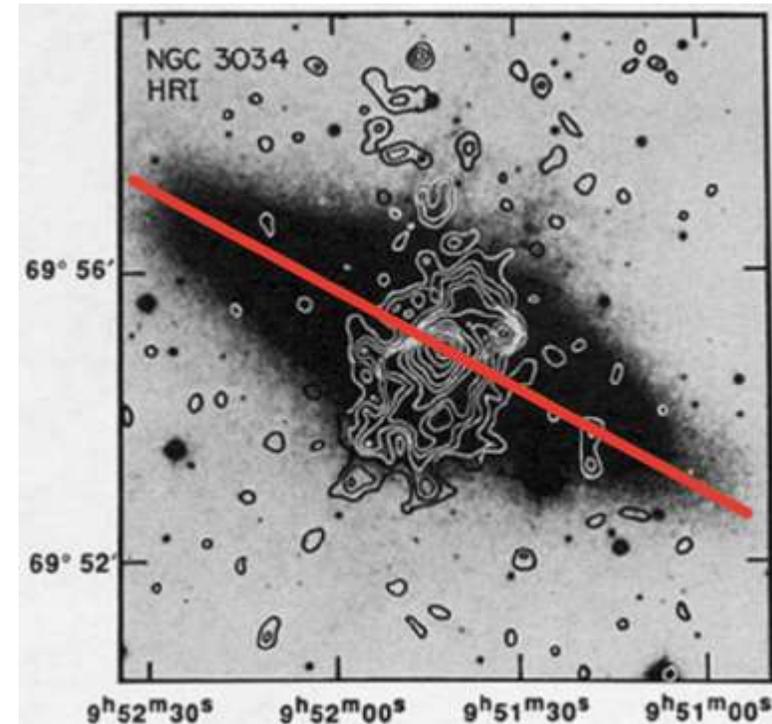
Магнитное поле M82

STEP 2

Берем наблюдения магнитного поля галактики M82:



Наблюдения напряженности МП в M82



Рентгеновская спектральная область,
Внегалактическая база данных
НАСА/IPAC (телескоп Эйнштейна)

Для получения МП вдоль галактики мы берем срез (красная линия).

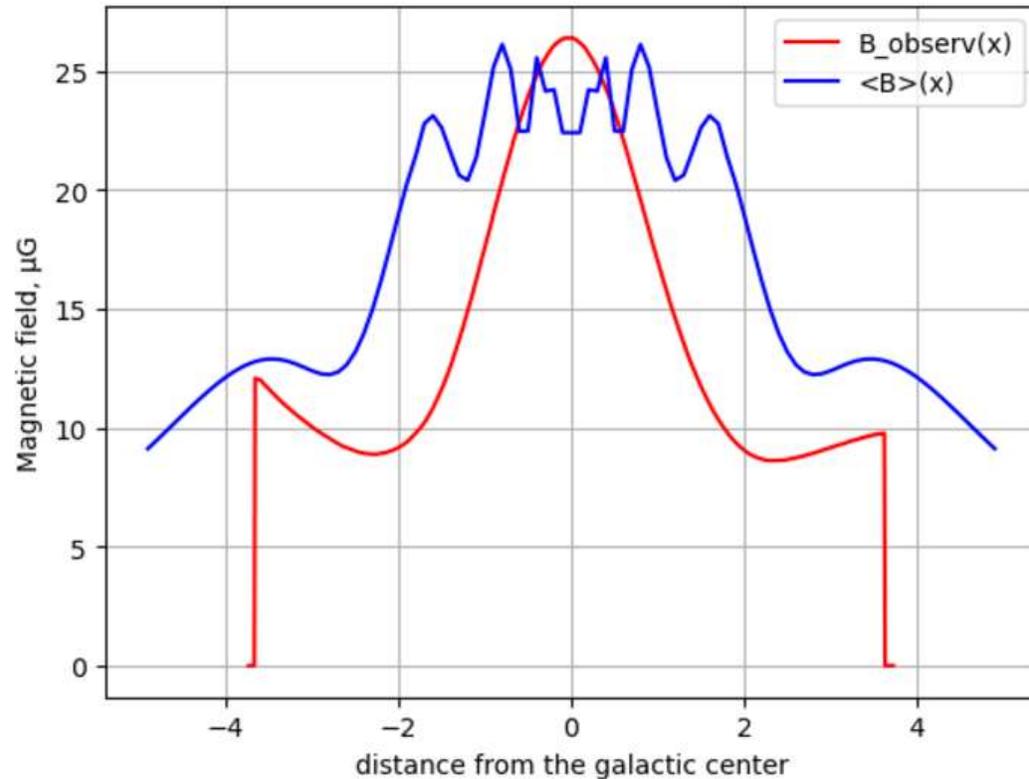
Магнитное поле M82

STEP 2

1.) Для сшивки модели и наблюдений мы определяем(при $z = 0$):

2.) Then we plot both magnetic fields to obtain the best fit between them:

$$\langle B \rangle (x) = \frac{\int_{-y(x)}^{y(x)} B_{model}(x, y') \rho(y') dy'}{\int_{-y(x)}^{y(x)} \rho(y') dy'}$$



2.) В результате, мы определяем нормировку для параметров B_0 (для поля диска) и B_x (для X-shape).

Распространение аксионов в M82 STEP 2

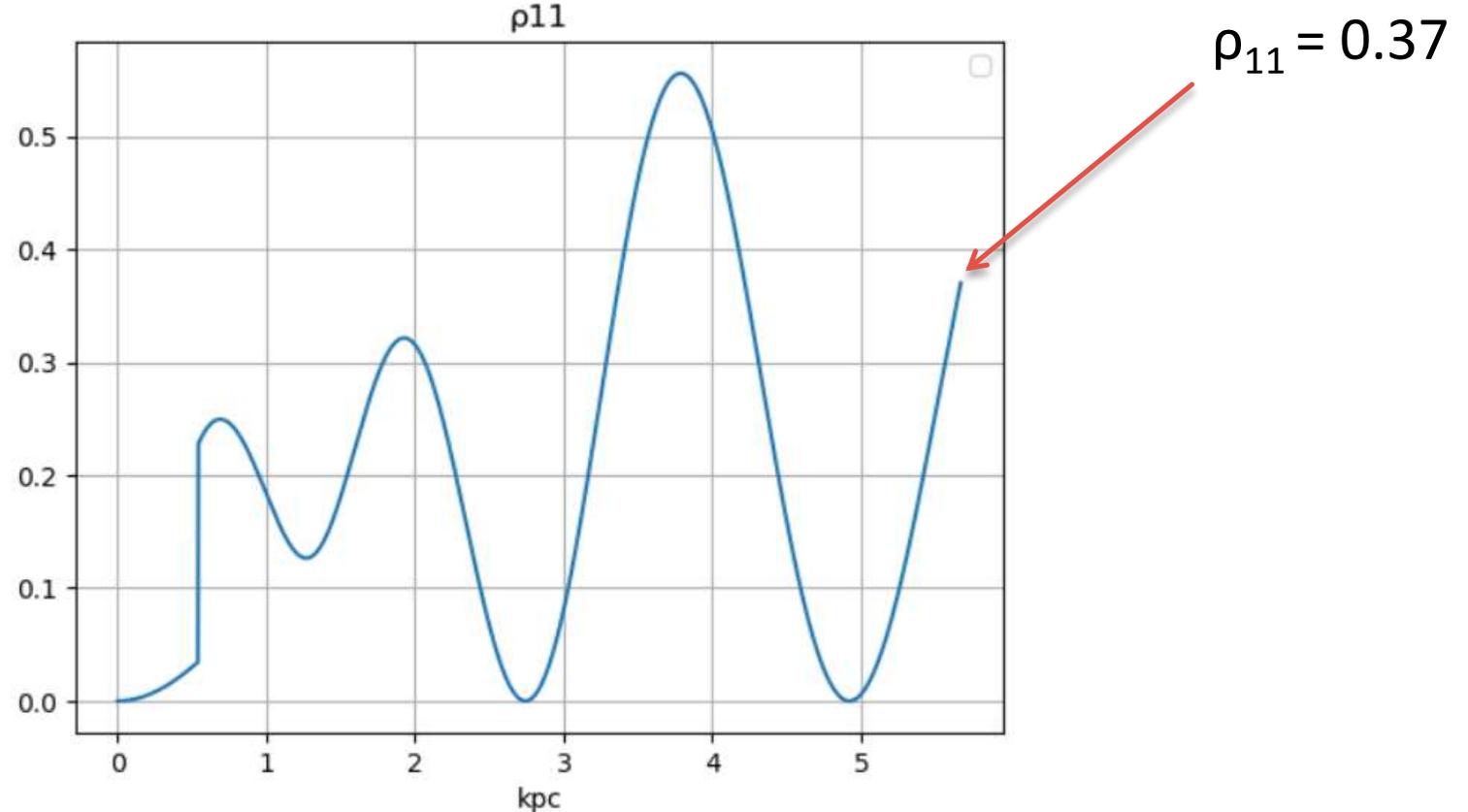
Подставляя магнитные поля в матрицу смешивания, мы численно решаем уравнение Лиувилля в галактике M82:

Параметры:

$$\omega_a = 2MeV$$

$$m_a = 10^{-10}eV$$

$$g_{a\gamma\gamma} = 10^{-11}GeV^{-1}$$



Конечное состояние ρ_{11} (ρ_{22} и ρ_{33}) в M82 соответствует начальному состоянию $\rho_{11}(0)$ в межгалактическом пространстве, таким образом:

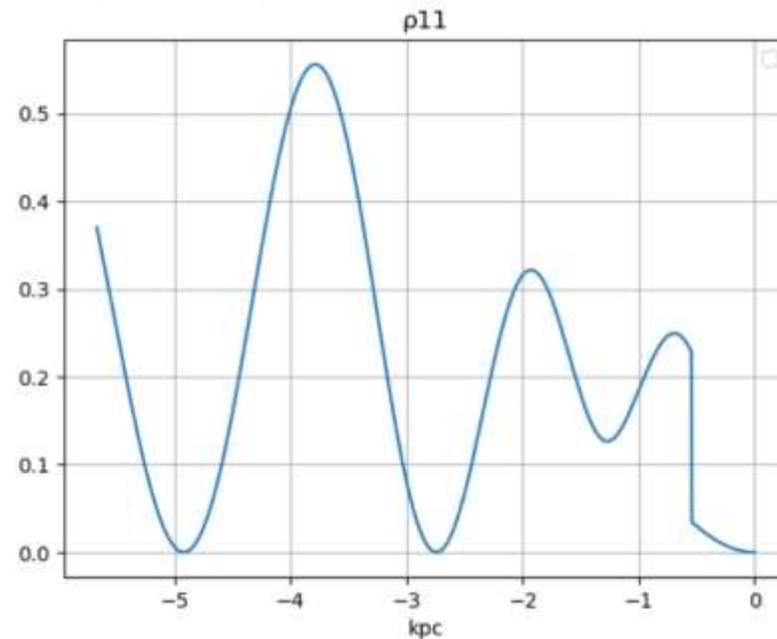
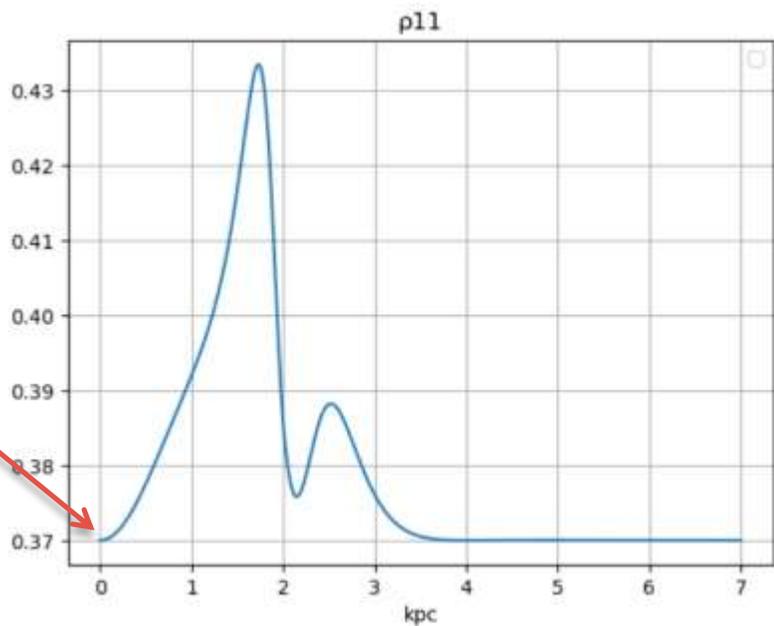
$$\rho(0)^{IG} = \text{diag}(0.37, 0.05, 0.58)$$

Распространение аксионов от M82 до Млечного Пути

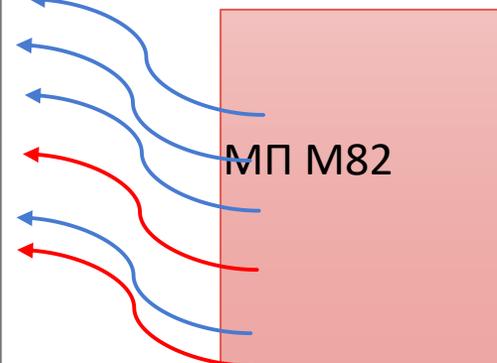
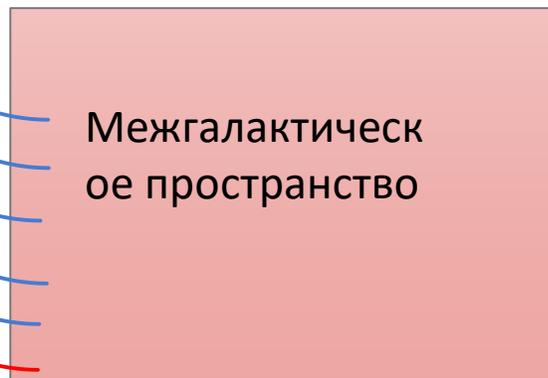
STEP 2

Решая то же уравнение в межгалактическом пространстве и Млечном Пути, получаем:

$$\rho_{11} = 0.37$$



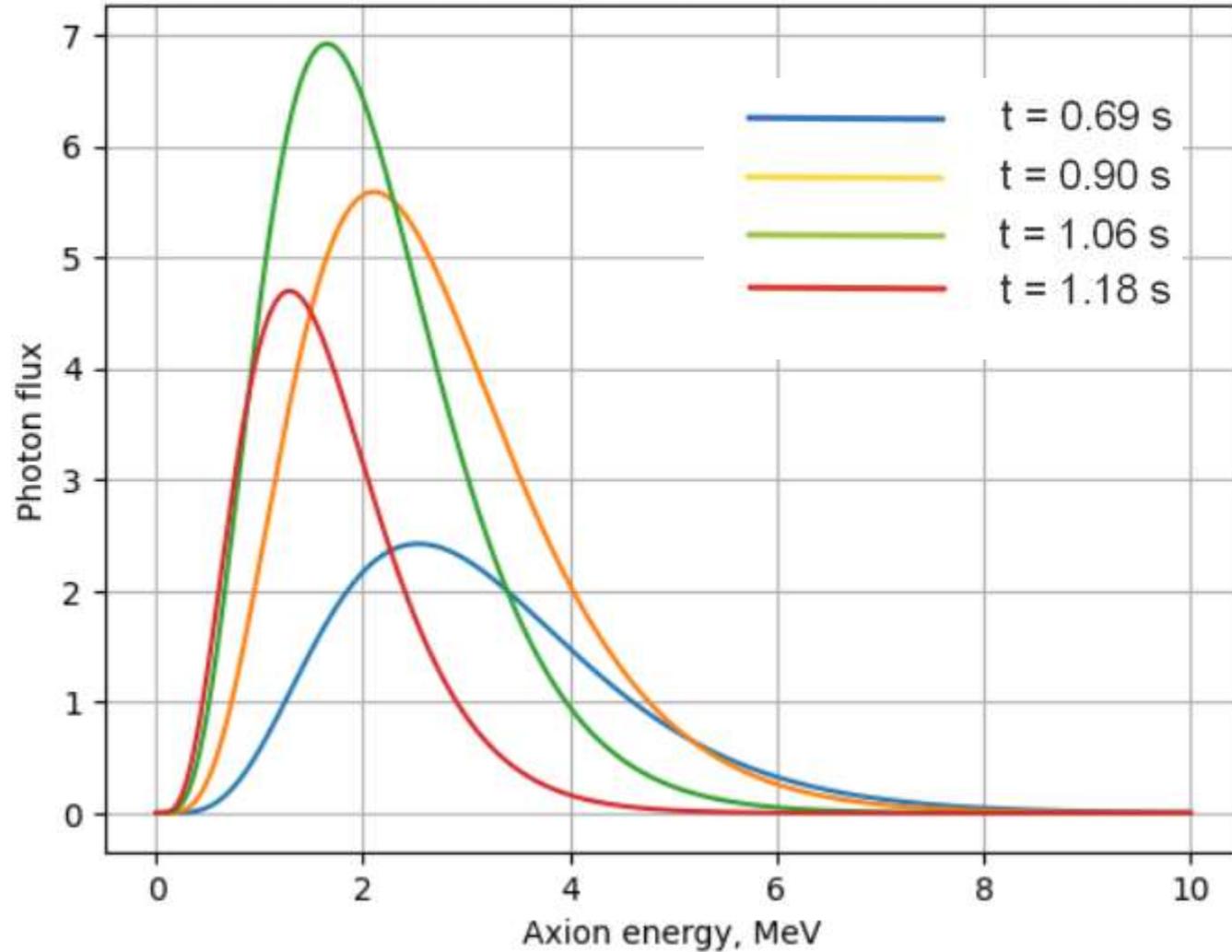
←
Распространение почти без осцилляций



Аксионы + фотоны

Аксионы + фотоны

The flux of photons on Earth that a telescope with an area of 2 m^2 will see in 2 seconds



Заключение и планы

- 1.) Мы построили спектр аксионов сверхновой типа Ia;
- 2.) Мы проанализировали поведение распространения системы «аксион-фотон» и нашли вероятность пронаблюдать фотон около Земли, тем самым теоретически предсказывая поток фотонов на Земле.
- 3.) Следующий шаг связан с экспериментальной частью работы; будет проведено сравнение теоретического числа фотонов с наблюдательными данными.

Исследование проводилось при поддержке **Российского научного фонда**.
грант 22–12–00215.

Автор является стипендиантом фонда "БАЗИС"

Thanks!