

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

"МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. Ломоносова"

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КУРСОВАЯ РАБОТА

Аксион-фотонные осцилляции в магнитном
поле галактики

Спиридонов Андрей Николаевич

Научный руководитель
д.ф.-м.н Рубцов Григорий Игоревич

Москва, 2017 г.

Содержание

1. Введение	2
2. Моделирование	2
2.1. Уравнения движения	2
2.2. Алгоритм	3
2.3. Величины	4
3. Результаты	5
4. Основные выводы	7

1. Введение

Аксионы - гипотетические псевдоскалярные частицы, соответствующие θ параметру, который является динамическим полем в QCD лагранжиане в теории Печчеи-Квинн[3]. Можно показать, что аксионы и подобные им частицы (ALP) смешиваются с фотонами во внешнем магнитном поле (механизм схож с осцилляциями нейтрино)[2]. Недавно было показано[1], что свет от далеких источников не тускнеет, распространяясь сквозь межзвездное пространство, хотя вероятность рассеивания на микроволновых фотонах высока (так, например, реализуется сценарий рождения электрон-позитронной пары). Были предложены способы[1] разрешить этот парадокс, в том числе с привлечением механизма аксион-фотонного смешивания, например, аксион не взаимодействуя пролетает сквозь микроволновое излучение и осциллирует обратно в фотон в магнитном поле Млечного Пути. В данной работе произведена попытка моделирования таких осцилляций, с целью проверить возможность реализации таких сценариев.

2. Моделирование

2.1. Уравнения движения

Вывод уравнений движения можно начать с постулированного в литературе[2] Лагранжиана классической теории поля

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu a \partial^\mu a - m^2 a^2) - \frac{a}{4M} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \quad (1)$$

Применив второе уравнение Лагранжа сперва для F , затем для a , получим

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = J^\nu + \frac{1}{M} \tilde{F}^{\mu\nu} \partial_\mu a \quad (2)$$

$$(\square + m^2)a = -\frac{1}{4M} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} \quad (3)$$

Откуда можно получить[7], подставив F по определению, и учитывая внешнее магнитное поле

$$\square \mathbf{A} = \frac{1}{M} \mathbf{B}_\perp \partial_t a \quad (4)$$

$$(\square + m^2)a = -\frac{1}{M} \mathbf{B}_\perp \cdot \partial_t \mathbf{A} \quad (5)$$

Данную связанную систему перепишем в операторном виде

$$[\omega^2 + \partial_z^2 + \mathcal{M}] \begin{pmatrix} A_\parallel \\ A_\perp \\ a \end{pmatrix} = 0 \quad (6)$$

Теперь, предполагая (что выполняется и в действительности), что $|n - 1| \ll 1$ и $\mathbf{A} = \mathbf{A}_0(z)e^{i(\omega t - kz)}$, а также, что \mathbf{B} можно считать однородным на расстояниях порядка длины волны фотона можно [8] записать

$$\omega^2 + \partial_z^2 = (\omega - i\partial_z)(\omega + i\partial_z) = (\omega - i\partial_z)(\omega + k) \approx 2\omega(\omega - i\partial_z) \quad (7)$$

Применив к уравнению в операторной форме

$$\left[\omega - i\partial_z + \frac{1}{2\omega} \mathcal{M} \right] \begin{pmatrix} A_{\parallel} \\ A_{\perp} \\ a \end{pmatrix} = 0 \quad (8)$$

Теперь введем оператор плотности по следующему правилу

$$\rho = \begin{vmatrix} A_{\parallel} \\ A_{\perp} \\ a \end{vmatrix} \left\langle \begin{matrix} A_{\parallel} \\ A_{\perp} \\ a \end{matrix} \right| \quad (9)$$

Для него справедливо следующее уравнение, называемое уравнением фон-Неймана-Лиувилля

$$i \frac{\partial \rho}{\partial z} = [\widehat{\mathcal{M}}, \rho] \quad (10)$$

Именно это уравнение в дальнейшем решается численно.

2.2. Алгоритм

Для численного решения уравнения 10 используется алгоритм Рунге-Кутты 4-ого порядка, с начальными условиями 1 (только аксион или только фотон).

Матрица \mathcal{M} вычисляется в каждой точке области интегрирования для трех различных моделей магнитного поля [4][6][5] и различных характерных величинах (свойствах частиц, как-то: масса, энергия и т.д. подробности в секции "Величины"). Таким образом у нас появляется огромная выборка моделей, для каждой из которых необходимо построить результаты моделирования.

$$\rho_{init} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ or } \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Рис. 1. Начальные условия

Результатом в данном контексте является вычисленная вероятность появления в солнечной системе частицы определенного типа, в зависимости от начальных условий. Для наглядного представления результатов мы рисуем небесную карту подобную карте микроволнового излучения 2.

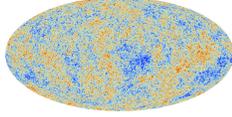


Рис. 2. Микроволновое излучение

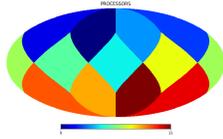


Рис. 3. Разделение карты неба

Для решения такой трудоемкой задачи мы используем параллельные вычисления на суперкомпьютерном кластере Ломоносов. Разделение карты неба на отдельные участки и соответствующую пикселизацию обеспечивает библиотека Healpy [9]. В начале процесса небольшой скрипт (Python) разделяет выборку начальных данных и передает программе, которая посредством технологии Boost.MPI разделяет данные между вычислительными узлами и иницирует вычисления карт неба, каждая из которых делится на участки (приблизительно изображено на 3). Каждая из отдельных областей вычисляется отдельным потоком (ядром процессора) при помощи технологии OpenMP [11].

2.3. Величины

Гамильтониан системы 10 имеет следующий вид

$$\widehat{\mathcal{M}} = \begin{pmatrix} \omega(n-1) & 0 & \frac{B_i}{2M} \\ 0 & \omega(n-1) & \frac{B_j}{2M} \\ \frac{B_i}{2M} & \frac{B_j}{2M} & \frac{m^2}{2\omega} \end{pmatrix} \quad (11)$$

где
 $\omega \in 2e11, 4e11$ [eV]
 $M \in 2e11, 4e11, 6e11$ [eV]
 $m \in 1e-8, 1e-7, 1e-6$ [eV]

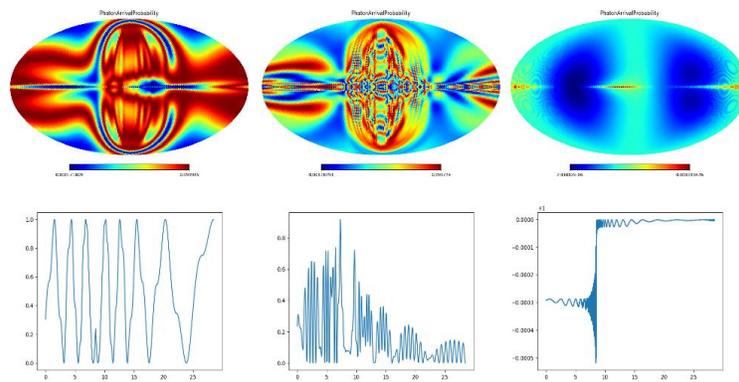
Величины B_i и B_j вычислены в каждой требуемой точке пространства, полагаясь на теоретическое описание соответствующих моделей, а все остальные величины взяты из [7].

3. Результаты

Соответствующие картки расположены в столбик: карта неба для заданных параметров (классические, близкие к ограничениям, экстремальные) и осцилляции при эволюции вдоль направления на центр галактики.

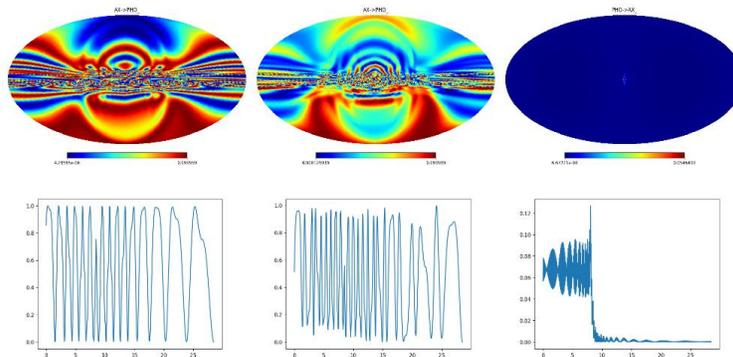
Некоторые результаты для модели Harrari, Mollerach, Roulet, 1999[4]:

Harrari, Mollerach, Roulet, 1999



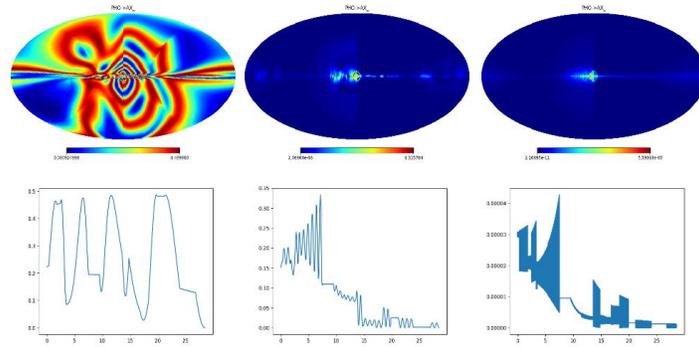
Некоторые результаты для модели Pshirkov, Tinyakov, Kronberg, 2011[6]:

Pshirkov, Tinyakov, Kronberg, 2011

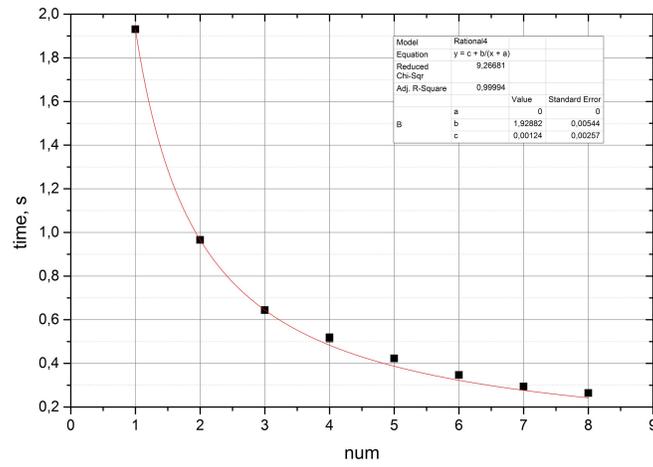


Некоторые результаты для модели Farrar, Jansson, 2012[5]:

Farrar, Jansson, 2012



А так же результаты времени работы в зависимости от числа потоков на одном узле:



4. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В рамках данной работы был создан большой массив данных моделирования для дальнейшего изучения, и программный интерфейс, позволяющий промоделировать эволюцию системы аксион-фотон в заданном поле, который можно будет использовать, например, для прикидки работы экспериментальной установки

Список литературы

- [1] G.I. Rubtsov, S.V. Troitsky, «Breaks in gamma-ray spectra of distant blazars and transparency of the Universe», 2014, <https://arxiv.org/pdf/1406.0239.pdf>
- [2] Georg Raffelt, «Stars as laboratories for fundamental physics», 1998, <http://wwwth.mpp.mpg.de/members/raffelt/mypapers/199613.pdf>
- [3] R.D. Peccei, «The Strong CP Problem and Axions», 2006, <https://arxiv.org/pdf/hep-ph/0607268.pdf>
- [4] D. Harari, S. Mollerach and E. Roulet, JHEP 9908, 022 (1999) [arXiv:astro-ph/9906309]
- [5] Ronnie Jansson, Glennys R. Farrar, A New Model of the Galactic Magnetic Field, arXiv:1204.3662v1 [astro-ph.GA]
- [6] M. S. Pshirkov, DERIVING THE GLOBAL STRUCTURE OF THE GALACTIC MAGNETIC FIELD FROM FARADAY ROTATION MEASURES OF EXTRAGALACTIC SOURCES, arXiv:1103.0814v3 [astro-ph.GA] 1 Dec 2011
- [7] Anselm 1988; Raffelt and Stodolsky 1988;
- [8] Raffelt and Stodolsky 1988;
- [9] <http://healpix.sourceforge.net>
- [10] K. Ahnert and M. Mulansky, Odeint - Solving Ordinary Differential Equations in C++, AIP Conf. Proc. 1389, pp. 1586-1589 (2011); doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.3637934>
- [11] www.openmp.org