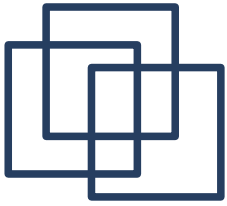


Московский Физико-Технический Институт (ГУ) ,
Факультет Проблем Физики и Энергетики ,
Кафедра Фундаментальных взаимодействий и космологии

Проблема темной материи и рождение фермионов в постинфляционный период

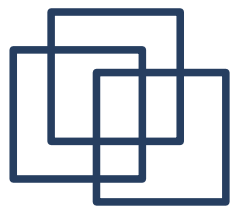
Выполнил : Микаелян А.С.
Руководитель : Ткачев И.И.

Москва, ИЯИ, 2012



Проблема темной материи

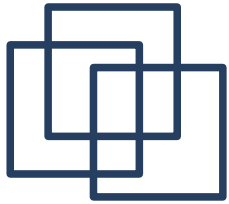
- Темная материя – это особая форма материи, которая должна обладать двумя свойствами.
 - 1) Частицы должны быть нерелятивистскими
 - 2) Частицы не должны взаимодействовать с фотонами.
- Вклад в общую плотность материи оценивается на уровне 22%.
- Претендентов на роль темной материи много.



Кандидаты на роль темной материи

Виды темной материи	Характерные массы	Кандидаты
Теплая	Порядка несколько КэВ	Стерильное нейтрино, аксионы
Холодная	Сотни ГэВ	WIMP (Weakly Interacting Massive Particles)

Нами будет рассмотрено стерильное нейтрино.

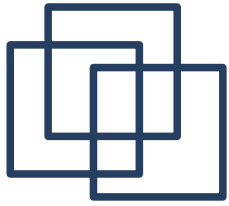


Стерильное нейтрино

- СН – это фермион, который может смешиваться с обычными нейтрино. Космологические оценки для вклада в современную плотность энергии Вселенной следующие,

$$\varpi = 0,2 \left(\frac{\sin 2\theta}{10^{-4}} \right)^2 \left(\frac{m_\nu}{1 \text{ keV}} \right)^2 ;$$

Таким образом стерильные нейтрино с массами больше 1 KeV и малым углом смешивания могут составлять темную материю



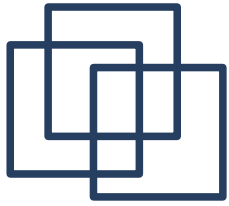
Рождение фермионов

- Нами будет рассмотрен процесс рождения частиц в постинфляционный период путем распада колебаний инфлатонного поля за счет его взаимодействия с фермионами.
- Наша модель (“хаотическая инфляция”)

$$V(\varphi) = \frac{m^2}{2} \varphi^2$$

- Уравнение Дирака в расширяющейся Вселенной

$$\left(\frac{i}{a} \gamma^\mu \partial_\mu + i \frac{3}{2} H \gamma^0 - m \right) X = 0$$



Решение уравнения Дирака

- Для решения УД мы переходим к киральному представлению и тем самым мы получаем систему на суперпозицию спиноров χ_R и χ_L

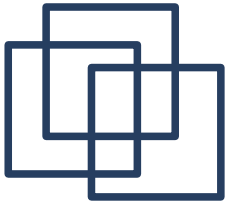
$$i u' - k v - a m u = 0$$

$$i v' - k u + a m u = 0$$

где $u = \chi_L + \chi_R$, $v = \chi_L - \chi_R$

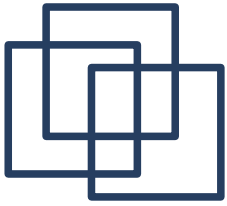
- Окончательно получаем уравнение второго порядка

$$v'' + [a^2 m^2 + k^2 - i(a m)'] v = 0$$



Что делать?

- На языке КТП – это процесс рождения частиц в нестационарном внешнем инфлатонном поле
- Для этого случая разработан метод решения задачи, основанный на преобразованиях Боголюбова. Их суть заключается в рассмотрении решения в прошлом и будущем. Причем в прошлом у нас имеется полная однозначность в определении вакуума, в силу отсутствия частиц в начале.
- В силу адиабатичности изменения частоты можем использовать ВКБ – метод.



ВКБ-метод

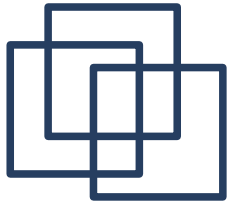
- Перепишем наше изначальное уравнение в окрестности времени, где происходит рождение частиц.

$$v'' + [a^2 g^2 \varphi'^2 (\eta - \eta_0)^2 + k^2 - i(am)'] v = 0$$

- Это есть стационарное уравнение Шредингера, у которого общее решение есть суперпозиция положительно- и отрицательно-частотных решений, т.е.

$$v = v^{пол.} A^{пол.} + v^{отр.} B^{отр.}$$

- где $v^{пол.} = C_1(t) \exp i \int w dt$

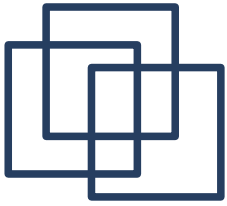


Метод Боголюбова

- Наша цель – найти коэффициенты Боголюбова, которые “сидят,, в операторе рождения.

Для этого

- 1) Необходимо найти решение уравнения поля, обладающее положительной частотностью в прошлом.
- 2) Выяснить асимптотику данного решения в будущем и разложить данное решение по положительно - и отрицательно-частотным функциям в будущем.
- 3) Коэффициенты при разложении и есть искомые коэффициенты Боголюбова.

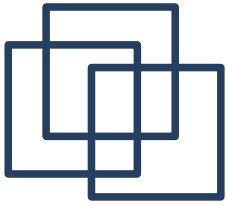


Значение коэффициента Боголюбова

- КБ есть ничто иное как пространственная плотность
плотность числа рожденных частиц в элементе
импульсного объема. Итого,

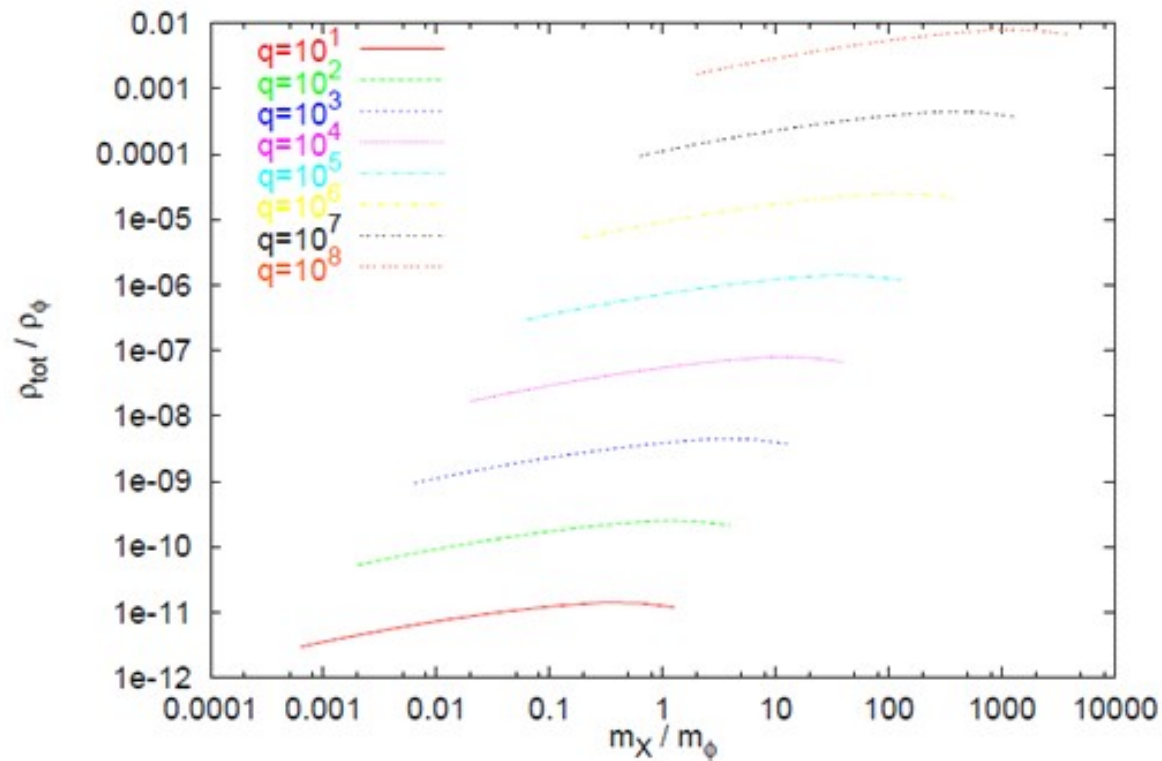
$$n(q) = |\beta|^2 = \exp \frac{-\pi q^2}{g \dot{\phi}}$$

где q - физический импульс

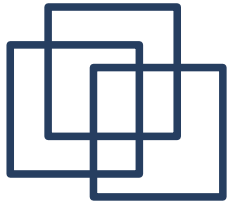


Численный расчет

- Зависимость плотности энергии фермионов от массы частицы



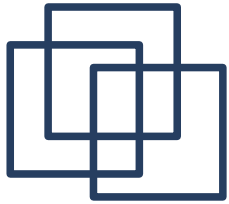
- График из статьи M.Peloso, L.Sorbo "Preheating of massive fermions after inflation: analytical results"



Численный анализ

- 1) Отношение плотности фермионов к инфлатонному полю от массы фермиона зависит от числа q .
- 2) Рождаются частицы с массой вплоть до $10^{-12} q$

величина $q = \frac{g^2 \varphi(0)^2}{4m^2}$

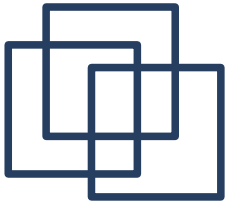


Объяснение численных результатов

- Эти результаты получаются аналитически.

$$\frac{\rho_x}{\rho} = q m^{1/2} \left(\ln \frac{\sqrt{q}}{m} \right)^{3/2}$$

- Все 2 пункта подтверждаются



Окончательный результат

- Как следует из вышесказанного, возможно только рождение тяжелых фермионов, а рождение легких остается под вопросом. А ответ скорее всего кроится в сингулярности плотности частиц при малых массах.
- Как следствие, надо рассматривать более сложные модели, как например взаимодействие с гравитацией.