МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА N40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 539

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
по теме:
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ЧАСТИЦАМИ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

Руководитель НИРС,
д.ф.-м.н., проф. _____ М.Ю. Хлопов
подпись

Научный консультант,
д.ф.-м.н., проф. _____ В.И. Корчагин
подпись

Студент гр. М20-115 _____ А.И. Коваленко
подпись

Москва 2020

Содержание

Введение.....3
1 Космические лучи.....4
1.1 Интенсивность космических лучей.....5
2 Темная материя.....8
2.1 Гало темной материи.....10
2.2 Рассматриваемая модель.....11
3 Расчет числа столкновений.....12
Заключение.....14
Список использованных источников.....15

Введение

Ряд астрофизических наблюдений, в частности исследование скоплений галактик и галактических ротационных кривых, свидетельствуют о существовании темной материи как одного из компонентов вещества Вселенной. Темная материя существует, в частности, в виде сферического гало, окружающего галактики. Актуальной проблемой как астрофизики, так и физики элементарных частиц, является построение теории взаимодействия частиц темной материи с барионным веществом и излучением, а также нахождение способов прямого или косвенного детектирования частиц темной материи.

Одной из составляющих вещества галактики являются космические лучи. Космические лучи представляют собой поток ядер атомов, большей частью протонов. Космические лучи рождаются и ускоряются до высоких энергий в космических объектах или в космическом пространстве, взаимодействуя с веществом и магнитными полями галактики. В данной работе рассматриваются особенности космических лучей и возможность их взаимодействия с частицами темной материи. Приводится теоретическая модель частиц темной материи, представляющих собой гипотетические стабильные частицы O^{--}, образующие нейтральные атомоподобные состояния OHe с первичным гелием, в связи с чем избегают прямого экспериментального открытия.

Целью данной работы является изучение особенностей распространения космических лучей в галактике и проведение расчета возможного числа столкновений ядер космических лучей с частицами темной материи.

1 Космические лучи

Космические лучи в атмосфере Земли впервые были обнаружены в 1912 году австрийским физиком В. Гессом, который с помощью электроскопа измерил скорость ионизации воздуха в зависимости от высоты. В результате эксперимента было выяснено, что с ростом высоты величина ионизации сначала уменьшается, а затем на высотах свыше 2 км начинает резко возрастать. На высоте 9 км ионизационный ток оказался в 10 раз большим, чем у поверхности Земли[1].

Как в сильно разреженном релятивистском газе, частицы космических лучей практически не взаимодействуют друг с другом, но испытывают столкновения с веществом межзвёздной и межпланетной сред, подвергаются воздействию межзвездных магнитных полей. Важнейшими характеристиками космического излучения являются интенсивность, энергетический спектр, полная энергия и ядерный состав излучения.

Более 90% частиц космических лучей составляют атомы водорода, на гелий приходится около 7% и менее 1% – на более тяжёлые элементы[1]. Атомы космических лучей лишаются электронных оболочек при взаимодействии с веществом в процессе их переноса во Вселенной. Помимо ядер различных элементов в составе космических лучей имеются электроны. При равных энергиях интенсивность электронов в $\approx$ 100 раз меньше, чем протонов.

1.1 Интенсивность космических лучей

Одной из основных величин, которые характеризуют космические лучи, является их интенсивность:

$$I = \frac{dN}{\cos\theta \, dS \, dt \, d\Omega \, dE} \tag{1}$$

dN - число частиц, падающих на площадку dS, E — энергия космических лучей, $d\Omega$ характеризует направление распространения частиц.

Интегральная интенсивность определяется следующим образом:

$$I = \int_E^{\infty} I(E)\, dE \tag{2}$$

Интенсивность космических лучей, определенная экспериментальным путем, показана на рис. 1. Пунктирными линиями показана интенсивность, соответствующая эпохам минимума и максимума солнечной активности. Для трех значений энергии указаны величины интегральной интенсивности космических лучей.

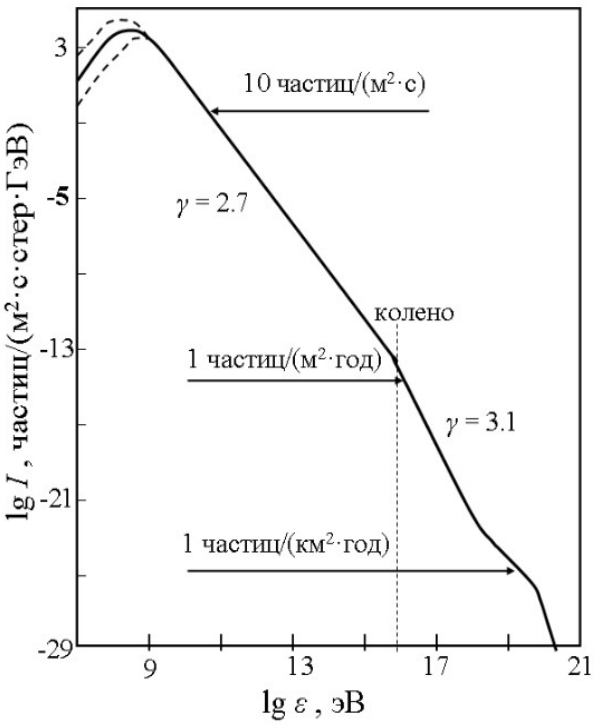

Рис. 1: Интенсивность космических лучей как функция кинетической энергии ε [2]

Это так называемый спектр всех частиц, включающий при данной кинетической энергии вклад ядер всех сортов. Вид спектра космических лучей зависит от действия трех факторов:

1) процесса ускорения частиц в астрофизических объектах, которые являются источниками космических лучей;

2) процесса распространения космических лучей в космической среде от источников до наблюдателя (т.е. до солнечной системы);

3) процесса распространения космических лучей в гелиосфере.

Основной особенностью спектра космических лучей является степенная форма зависимости их интенсивности от энергии [1]:

$$I \approx E^{-\gamma} \tag{3}$$

Показатель спектра равен:

1) $\gamma = 2.7$ при энергии $E < 3 \cdot 10^{15}$ эВ

2) $\gamma = 3.1$ при энергии $E > 3 \cdot 10^{15}$ эВ

При энергии $E_k = 3 \cdot 10^{15}$ эВ спектр космических лучей испытывает излом, эта особенность спектра получила называние «колено».

Энергия E_k связана со значением предельной энергии частиц, генерируемых в галактических источниках космических лучей — остатках сверхновых[2].

Степенной спектр космических лучей простирается вплоть до энергии $E_{max} \approx 5 \cdot 10^{19}$ эВ. При энергиях $E > E_{max}$ интенсивность космических лучей I(E) отклоняется от степенной зависимости и спадает с увеличением энергии квазиэкспоненциально. Поэтому содержание частиц с энергиями $E > 10^{20}$ эВ в спектре космических лучей близко к нулю. Эта особенность возникает за счет больших энергетических потерь, которые испытывают частицы с энергией $E > E_{max}$ при их взаимодействии с заполняющим всю Вселенную микроволновым реликтовым излучением, когда источники этих частиц расположены за пределами Галактики на большом расстоянии d > 100 Мпк. Наличие экспоненциального обрыва в наблюдаемом спектре космических

лучей свидетельствует о том, что наиболее высокоэнергичные космические лучи имеют внегалактическое происхождение, т.е. они порождены внегалактическими объектами. Степенной характер спектра космических лучей нарушается также в области низких энергий $E < 10$ ГэВ[2]. Основным фактором, создающим эту особенность, является модулирующее воздействие солнечного ветра. Величина модулирующего воздействия зависит от энергии космических лучей: оно растет с уменьшением энергии.

2 Темная материя

Тёмная материя представляет собой гипотетическую разновидность вещества Вселенной, не участвующую в электромагнитном взаимодействии и проявляющуюся только в гравитационном, в связи с чем темная материя недоступна для прямого наблюдения. Составляет порядка четверти всей массы Вселенной.

Основанием для введения модели темной материи стал ряд астрофизических наблюдений. В частности, кривые вращения галактик демонстрируют отсутствие убывания скорости вращения на периферии звёздных дисков. Наиболее простым объяснением этого эффекта является наличие у галактик массивных невидимых гало, дающих большой вклад в их массы[3].

Существует несколько гипотез о составе темной материи. Одна из теорий заключается в том, что тёмная материя состоит из обычного барионного вещества, которое характеризуется слабым электромагнитным взаимодействием, в следствие чего не может быть обнаружено при исследовании линий излучения и поглощения. В качестве кандидатов на роль таких объектов могут быть рассмотрены: массивные планеты, коричневые карлики, чёрные дыры и т. д. Для обозначения таких объектов был предложен термин MACHO (massive astrophysical compact halo object)[3]. Однако эксперименты по поиску объектов MACHO в гало нашей Галактики путём выявления событий гравитационного микролинзирования света звёзд соседних галактик привели к заключению, что доля таких компактных объектов, по крайней мере с массами в диапазоне от 10^{-7} до 10^{2} масс Солнца, составляет не более 8%[3].

Теоретические модели рассматривают возможных кандидатов на роль небарионной темной материи. Частицы-кандидаты должны удовлетворять определенному набору характеристик: они должны быть стабильными, должны обеспечивать измеренную плотность скрытой массы и отделиться от

плазмы и излучения, по крайней мере до начала стадии доминирования вещества[4]. Объяснить природу темной материи пытаются с помощью таких объектов как суперсимметричные частицы, нейтральные, элементарные, слабовзаимодействующие частицы – WIMP-ы (Weakly Interacting Massive Particle)[3].

2.1 Гало темной материи

О наличии тёмной материи в гало свидетельствует её влияние на кривую вращения галактик. При отсутствии большого количества массы в сферическом гало скорость вращения галактики убывала бы на больших расстояниях от её центра аналогично тому, как орбитальные скорости планет убывают с расстоянием от Солнца. Однако наблюдения спиральных галактик, в том числе радионаблюдения линии излучения нейтрального водорода, показывают, что кривые вращения большинства галактик становятся пологими при удалении от центра галактики (рис. 2). Таким образом, скорость вращения не проявляет быстрого убывания с увеличением расстояния от галактического центра.

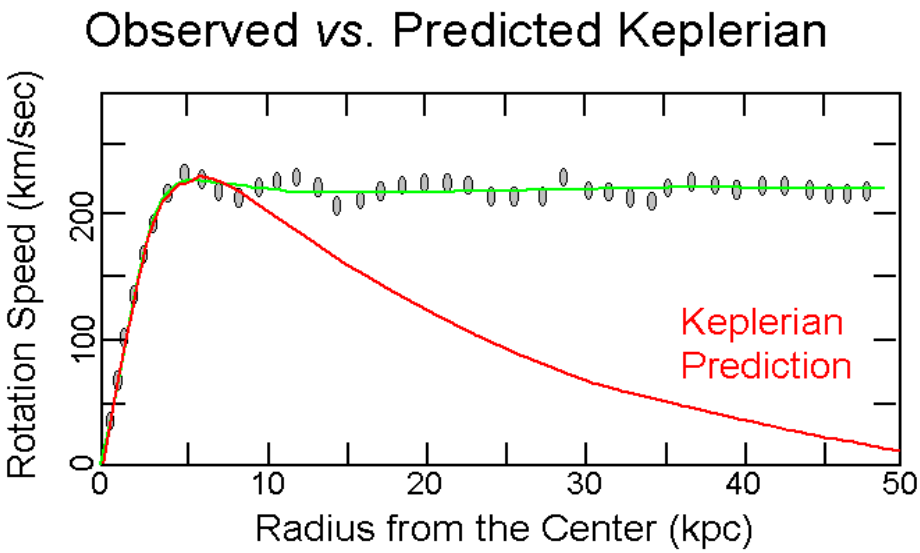

Рис 2. Различие между наблюдаемыми и предсказываемыми кривыми вращения

Численное моделирование формирования структуры гало в расширяющейся Вселенной привело к модели профиля Наварро—Френка—Уайта пространственного распределения плотности темной материи в гало[5]:

$$\rho = \frac{1}{4} \frac{M_h}{\pi R (R + a_h)^2} \quad , \tag{4}$$

где R — радиус гало, M_h — масса гало, a_h — параметр распределения.

2.2 Рассматриваемая модель

На данный момент существуют гипотезы, включающие в себя в качестве частиц-кандидатов темной материи стабильные частицы, обладающие некоторой новой фундаментальной симметрией и соответствующим ей сохраняющимся зарядом[7]. Однако, если они существуют, то должны быть связаны с обычным веществом и образовывать ядра с аномальным отношением Z/A. Экспериментальные ограничения на такие изотопы, особенно на аномальный водород, ограничивают возможность существования таких стабильных положительно заряженных частиц [8]. Эта проблема неразрешима, если модель предсказывает стабильные частицы с отрицательным единичным зарядом (X^-).

В связи с этим рассмотрим стабильные отрицательно заряженные частицы с зарядом -2 и будем обозначать их O^{--}[6]. Такие частицы могут формировать с первичным гелием нейтральные атомоподобные состояния *OHe*. Существуют различные модели, в которых предсказываются такие стабильные заряженные частицы. Столкновение составной темной материи с веществом может приводить к возбуждению рассматриваемых атомов. Обнаружение тяжелых заряженных частиц позволит получить новые экспериментальные подтверждения существования темной материи.

3 Расчет числа столкновений

Проведем оценку числа столкновений частиц космических лучей и частиц темной материи в гало. Для оценки предположим, что поток космических лучей изотропен, интенсивность постоянна. Выделим на сферическом слое гало площадку S'.

Число рассеянных частиц после взаимодействия с площадкой S'

$$dN = I\, n\, S'\, \Sigma_{вз}\, dr \tag{5}$$

Дифференциальное сечение взаимодействия в общем виде:

$$\Sigma_{вз} = \int_0^{4\pi} \frac{d\Sigma}{d\Omega} d\Omega = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} \Sigma(\theta,\varphi)\sin\theta\, d\theta\, d\varphi = 2\pi \int_0^{\pi} \Sigma(\theta)\sin\theta\, d\theta \tag{6}$$

Профиль пространственного распределения плотности темной материи зависит от массы гало. Для оценки концентрации частиц темной материи в гало разделим плотность на массу одной частицы. Масса частицы темной материи предполагается равной 1 Тэв[6].

Масса гало может быть выражена через массу солнца[5]

$$M_h = 2.35\cdot 10^{12}\cdot M_{sol} \quad , \quad M_{sol} = 1.989\cdot 10^{30}\,\text{кг} \tag{7}$$

Масса частицы темной материи в килограммах:

$$m_0 = 1.78\cdot 10^{-24}\,\text{кг}$$

Таким образом, число частиц темной материи в гало можно оценить следующим образом:

$$n = 6.5\cdot 10^{61} \frac{1}{\pi R (R + 1.41\cdot 10^{21})^2} \quad , \tag{8}$$

где $a_h = 1.41\cdot 10^{-24}$ кг [5].

Подставим (3), (6), (8) в (5). Вместо отдельной выделенной площадки рассмотрим площадь поверхности сферического гало. Формула для оценки числа взаимодействий выглядит следующим образом:

$$N = 2\pi \int_0^{\pi} \Sigma(\theta)\sin\theta\, d\theta \int_0^{R} 6.5\cdot 10^{61} \frac{2\pi R^2}{\pi R (R + 1.41\cdot 10^{21})^2} dr \int_0^{E} E^{-\gamma} dE \tag{9}$$

Радиус гало R = 200 кпк = $6.17 \cdot 10^{21}$ м. Рассмотрим космические лучи энергией E = 10^{15} эВ, $\gamma = 2.7$. Сечение взаимодействия $\Sigma = 2 \cdot 10^{-29}$ м^2 . При данных параметрах оценка числа столкновений составляет N = $2 \cdot 10^2$ событий в секунду.

Для проведения дальнейших исследований необходимо рассмотреть особенности распространения космических лучей в гало в зависимости от удаленности от центра галактики, а также в зависимости от энергии. На разных сферических слоях гало необходимо учесть различный вклад космических лучей ультравысоких энергий.

Заключение

В данной работе были проведена оценка числа столкновений частиц темной энергии и космических лучей. Достаточно большое число событий позволяет уточнять рассматриваемую модель взаимодействия. В дальнейшем исследовании планируется рассмотреть возможные продукты взаимодействия космических лучей с составным атомом *OHe,* процессы, сопровождающие их распространение в межзвездной среде, а также вероятные пути их детектирования.

Список использованных источников

1. Мурзин В.С. Астрофизика космических лучей: Учебное пособие для вузов. - М.: Университетская книга; Логос, 2007. - 488 с.
2. Бережко Е.Г. Введение в физику космоса: Учебное пособие. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. - 206 с.
3. Sanders R. H. The Dark Matter Problem: A Historical Perspective. — Cambridge University Press, 2010.
4. M.Yu. Khlopov in Cosmion-94, Eds. M.Yu.Khlopov et al. (Editions frontieres, 1996) P. 67; M. Y. Khlopov in hep-ph/0612250, p 51.
5. Navarro, Julio F.; Frenk, Carlos S.; White, Simon D. M. The Structure of Cold Dark Matter Halos (англ.) // The Astrophysical Journal: journal. — IOP Publishing, 1996. — 10 May (vol. 462).— P. 563.
6. Belotsky K. M., Khlopov M. Y., Shibaev K. I. Composite Dark Matter and its Charged Constituents. – 2006. – arXiv: astro-ph/0604518 [astro-ph].
7. Bertone G., Hooper D., Silk J. Particle dark matter: evidence, candidates and constraints // Physics Reports. – 2005. – янв. – т. 405, No 5/6. – с. 279 – 390.
8. Cudell J. R., Khlopov M., Wallemacq Q. The nuclear physics of OHe // Bled Workshops Phys. - 2012. - т. 13. - с. 10 –27. – arXiv: 1211.5684 [astro-ph.CO]