

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

УДК 539

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Разработка модели взаимодействия тёмных атомов с веществом

Руководитель НИР,  
д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ М.Ю.Хлопов  
Студент \_\_\_\_\_ Т.Э.Бикбаев

Москва 2018

## 0.1 Введение

Одной из фундаментальных проблем физики нашего времени является проблема скрытой массы, то есть проблема противоречия между наблюдаемым поведением видимых астрономических объектов и расчетным, с учетом только этих объектов. По современным данным, наблюдаемое вещество во Вселенной составляет только около 4% от его состава, что же из себя представляют остальные 96% является во многом неизвестным. Считается, что 74% состава Вселенной образует так называемая “тёмная” энергия, а остальные 22% “тёмная” материя.

Так-как тёмная материя, являющаяся гипотетической формой материи, не испускает электромагнитного излучения и напрямую не взаимодействует с ним, её обнаружение и прямое наблюдение является весьма затруднительным.

Поэтому на данный момент существует множество теорий, предлагающих на роль кандидатов тёмной материи различные объекты.

В данной исследовательской работе в виде кандидата на роль тёмной материи рассматриваются тёмные атомы О-гелия ( $OHe$ ), в которых лептоноподобная двухзарядная частица  $O^{--}$  связана с первичным ядром гелия и делается попытка разработать модель их взаимодействия с ядрами вещества, представляющей интерес для прямых поисков темной матери. На данный момент эти поиски дали противоречивые результаты, ибо одни эксперименты, такие как DAMA/NaI и DAMA/LIBRA дали положительные результаты по обнаружению тёмных атомов, а, например, эксперимент XENON100 - отрицательные. Поэтому для получения объективных данных в будущем необходимо провести новые эксперименты при одинаковых условиях и используя одинаковые детекторы.

Плюсом модели  $OHe$  является то, что она освобождает физику темной материи от неизвестных особенностей “новой” физики и включает в себя только один параметр “новой” физики - массу  $O^{--}$ , но в то же время, она требует глубокого понимания деталей известной ядерной и атомной физики, которые до сих пор не так хорошо ясны.

Проблема темных атомов  $OHe$  заключается в том, что их составляющие могут слишком сильно взаимодействовать с нормальным веществом, так-как  $OHe$  нейтрален, но априори он обладает незэкранированным ядерным притяжением к внешним ядрам вещества. Чтобы избежать этой проблемы, предполагается, что эффективный потенциал между  $OHe$  и ядром вещества будет иметь барьер, предотвращающий попадание  $He$  и/или  $O^{--}$  в ядро, допускающий только одно связанное состояние и значительно уменьшающий взаимодействия  $OHe$ . В этих условиях во взаимодействиях  $OHe$  с веществом доминируют упругие столкновения, что важно для многих аспектов сценария  $OHe$ .

## 0.2 КВАНТОВОЕ РАССМОТРЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ $OHe$ С ЯДРАМИ

Рассмотрим задачу трёх тел. Дана система состоящая из двух взаимодействующих друг с другом частиц, движущихся во внешнем неоднородном электрическом поле, создаваемом третьей частицей, являющейся ядром элемента с зарядовым числом  $Z_A$ , приближающейся к данной системе.

Данная система является "тёмным" атомом, состоящим из отрицательно заряженной частицы  $O^{--}$  с зарядом  $-2e$  и ядра гелия  $He^{++}$  с зарядом  $+2e$ .

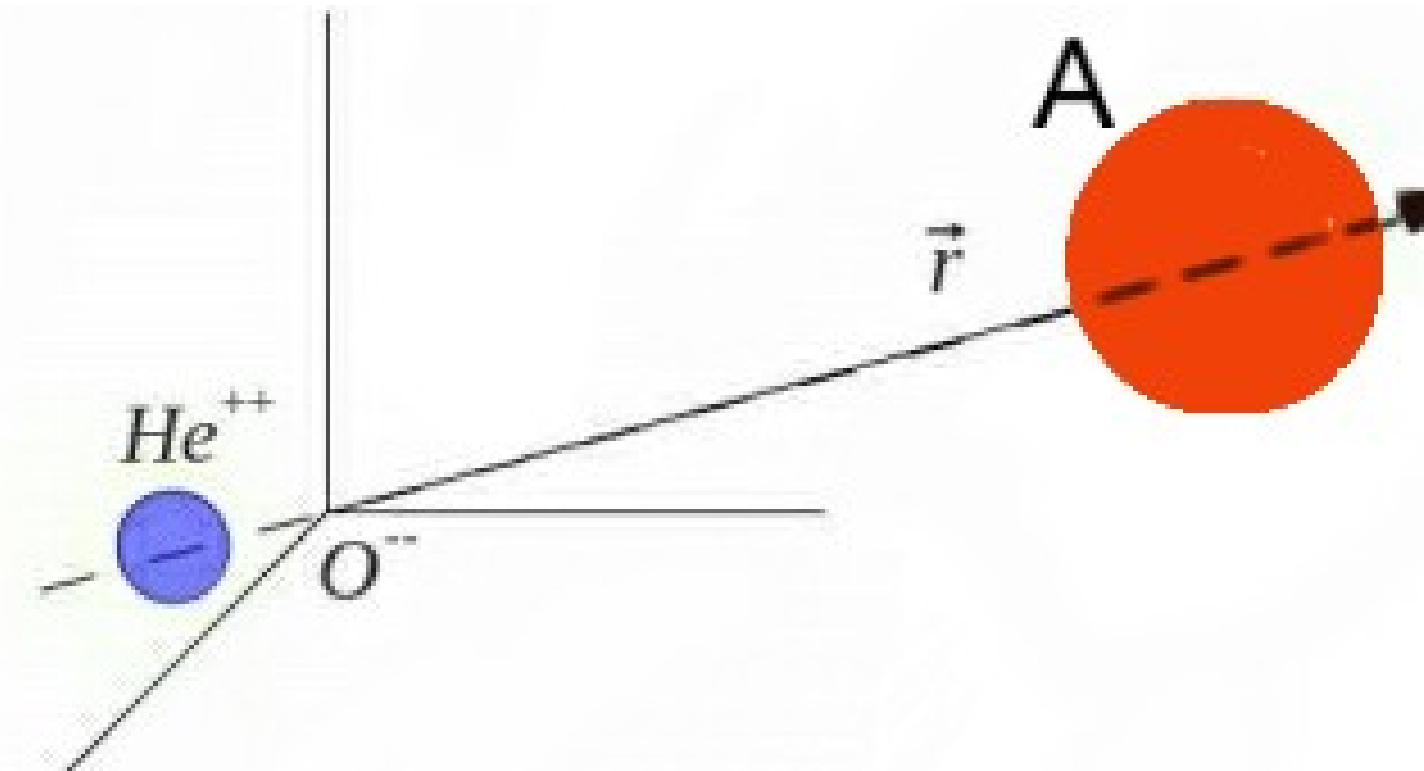


Рис. 1: Тёмный атом и внешнее ядро

На атом действует внешнее неоднородное электрическое поле с напряжённостью:

$$\vec{\epsilon} = \vec{\epsilon}(\vec{\rho}) = \frac{Z_A e \vec{\rho}}{\rho^3}, \quad (1)$$

где  $\rho$  это расстояние от источника напряжённости электрического поля до какой-то частицы,  $e$  это элементарный заряд.

Масса частицы  $O^{--}$   $m_T \gg m_{He}$  то есть намного больше массы ядра гелия.

Введём систему координат с началом в центре частицы  $O^{--}$ .

Гамильтониан атома, помещенного во внешнее электрическое поле, можно представить в виде:

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{U}_\epsilon, \quad (2)$$

где  $\hat{H}_0$  это гамильтониан изолированного (не подверженного внешним воздействиям) атома. Зная гамильтониан  $\hat{H}$ , можно записать уравнение Шрёдингера для атома, находящегося во внешнем электрическом поле напряженностью  $\vec{\epsilon}$ , и определить изменение энергии атома. Если поле  $\vec{\epsilon}$  слабое, то оператор  $\hat{U}_\epsilon$  является малой добавкой к  $\hat{H}_0$ . При этом собственные функции  $\psi$  и собственные значения  $E$  оператора  $\hat{H}$  мало отличаются от собственных функций  $\psi_0$  и собственных значений  $E_0$  гамильтониана  $\hat{H}_0$  невозмущенного атома.

Введём следующие вектора:  $\vec{r}$ ,  $\vec{R}_{OA}$  и  $\vec{R}_{HeA}$ , где  $\vec{r}$ - вектор взаимного расстояния между частицей  $O^{--}$  и ядром гелия,  $\vec{R}_{OA}$  - радиус-вектор внешнего ядра, а  $\vec{R}_{HeA}$  это вектор проведённый из центра ядра гелия до центра внешнего ядра. Причём только  $\vec{r}$  и  $\vec{R}_{OA}$  являются независимыми, а  $\vec{R}_{HeA} = \vec{R}_{OA} - \vec{r}$ .

Запишем чему равны  $\hat{H}_0$  и  $\hat{U}_\epsilon$ :

$$\hat{H}_0 = -\frac{\hbar^2}{2m_{He}}\Delta_{r,\theta,\phi} + V_{OHe}(r) = -\frac{\hbar^2}{2m_{He}}\Delta_{r,\theta,\phi} - \frac{4e^2}{r}, \quad (3)$$

где  $V_{OHe}(r) = -\frac{4e^2}{r}$  кулоновский потенциал взаимодействия частицы  $O^{--}$  с ядром гелия,  $\hbar$  постоянная Планка,  $\Delta_{r,\theta,\phi}$  оператор Лапласа в котором дифференцирование производится по переменным  $r, \theta$ , и  $\phi$ .

$$\hat{U}_\epsilon = V_{OA}(R_{OA}) + V_{HeA}(R_{HeA}) \quad (4)$$

где  $V_{OA}(R_{OA})$  потенциал взаимодействия частицы  $O^{--}$  с внешним ядром,  $V_{HeA}(R_{HeA})$  потенциал взаимодействия ядра гелия с внешним ядром, который включает в себя как кулоновское взаимодействие, так и ядерное. В отсутствие внешнего электрического поля атомная система имеет центр симметрии и среднее значение собственного дипольного момента у неё равно нулю, тогда как во внешнем электрическом поле атомная система приобретает индуцированный мультипольный момент.

$$V_{OA}(R_{OA}) = -\frac{2e^2 Z_A}{R_{OA}} \quad (5)$$

$$V_{HeA}(R_{HeA}) = \frac{2e^2 Z_A}{|\vec{R}_{OA} - \vec{r}|} - \frac{V_0}{1 + \exp\left(\frac{|\vec{R}_{OA} - \vec{r}| - R_A}{a}\right)}, \quad (6)$$

где  $R_A = r_0 A^{1/3}$  - радиус ядра;  $r_0 \approx 1,25$  фм, параметр, приближённо равный среднему расстоянию между нуклонами в ядре;  $A$  - массовое число ядра;  $a$  - параметр диффузности, характеризующий размытие края потенциальной ямы;  $V_0$  - глубина потенциальной ямы.

Найдём собственную функцию  $\psi$  оператора Гамильтона.

$$\hat{H}\psi = E\psi, \quad (7)$$

где  $E$  - это собственные значения оператора Гамильтона. Для этого нужно решить уравнение:

$$\begin{aligned} -\frac{\hbar^2}{2m_{He}}\Delta_{r,\theta,\phi}\psi - \frac{4e^2}{r}\psi - \frac{2e^2 Z_A}{R_{OA}}\psi + \frac{2e^2 Z_A}{\sqrt{R_{OA}^2 + r^2 - 2\vec{r}\vec{R}_{OA}}}\psi - \\ - \frac{V_0}{1 + \exp\left(\frac{|\vec{R}_{OA} - \vec{r}| - R_A}{a}\right)}\psi = E\psi \end{aligned} \quad (8)$$

Предположем, что  $\psi$  имеет частное решение в виде:

$$\psi = \psi(r, \theta, \phi, R_{OA}) = R(r)Y(\theta, \phi)P(R_{OA}) \quad (9)$$

Где  $R(r)$  представим в виде:

$$R(r) = \frac{\chi(r)}{r} \quad (10)$$

Тогда после преобразований получаем уравнение, которое нужно решить, в таком виде:

$$\begin{aligned}
\chi'' Y P + \frac{1}{r^2} \left[ \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial Y}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 Y}{\partial \phi^2} \right] \chi P + \frac{2m_{He}}{\hbar^2} \left[ E + \frac{4e^2}{r} - \frac{2e^2 Z_A}{R_{OA}} - \right. \\
\left. - \frac{2e^2 Z_A}{\sqrt{R_{OA}^2 + r^2 - 2\vec{r}\vec{R}_{OA}}} + \frac{V_0}{1 + \exp\left(\frac{|\vec{R}_{OA} - \vec{r}| - R_A}{a}\right)} \right] \chi Y P = 0 \quad (11)
\end{aligned}$$

## 0.3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимущества модели сложного темного вещества ОНе в том, что она минимально связана с параметрами новой физики и в основном основана на эффектах известной атомной и ядерной физики. Однако правильное квантовое рассмотрение этой проблемы оказывается довольно сложным по ряду причин. В моменты, когда внешнее ядро подходит достаточно близко к системе ОНе, расстояния на которых рассматривается их взаимодействие может быть незначительным и недостаточным для того, чтобы рассматривать ядро Не как точечную частицу. Также за пределами ядра ядерная сила падает экспоненциально, но она может быть достаточно сильной, чтобы вызвать неоднородное возмущение основного состояния атома ОНе.

Ядерная сила может действительно привести к изменению поляризации ОНе, что может повлечь за собой создание дипольного кулоновского барьера, но это происходит, когда теория возмущений больше не может быть применена, ибо изначально малая добавка  $\hat{U}_\epsilon$  становится значительно больше  $\hat{H}_0$ , и поэтому необходимо решить полученное уравнение Шредингера в этом режиме, либо численно, либо, если это возможно, аналитически.

Данная модель не может работать, если на некотором расстоянии между ОНе и ядром не возникнет отталкивающего взаимодействия, и решение данной задачи является жизненно важным для дальнейшего существования модели тёмного атома ОНе.

# Список литературы

1. Cudell J. R., Khlopov M., Wallemacq Q. The nuclear physics of OHe // Bled Workshops Phys. — 2012. — т. 13, № 2. — с. 10—27. — arXiv: 1211.5684 [astro-ph.CO].

[1]