Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

**«Национальный исследовательский ядерный университет»
«НИЯУ МИФИ»**

Кафедра № 40 «Физика элементарных частиц»

Отчет по работе на тему:

«Специфика формирования крупномасштабной структуры Вселенной в модели темных атомов»

Место выполнения:

НИЯУ МИФИ, Кафедра № 40 «Физика элементарных частиц»

Студент(номер группы): Карни Мд Вейс Ал (Б19-102)

Руководитель: Проф., д.ф.-м.н. Хлопов М.Ю.

Москва 2023г.

Содержание

1 Введение

Система темных атомов OHe похожа на боровскую систему атомов водорода, в отличие от атома водородаn, у темного атома OHe очень тяжелое ядро, которое состоит из равномерно отрицательно заряженных частиц O и частицы He, связанных вместе, возможного кандидата в Темную материю. Свойства системы темных атомов OHe, такие как ее энергетические уровни и вероятности переходов, определяются взаимодействием между частицами O и He, составляющими ядро. Система OHe dark atom представляет интерес для исследователей, изучающих темную материю, потому что это простая система, которую можно изучать теоретически, позволяя делать прогнозы о поведении более сложных систем темной материи. Кроме того, система темных атомов OHe может быть обнаружена благодаря ее взаимодействию с обычной материей, обеспечивая потенциальный способ косвенного обнаружения темной материи [1]. Скорость образования темных атомов OHe важна, потому что она определяет обилие этих частиц во Вселенной. Это изобилие, в свою очередь, может иметь важные последствия для астрофизики и космологии.

Например, присутствие атомов OHe dark может оказывать влияние на наблюдаемые свойства галактик и других астрономических объектов. Эти темные атомы также могут вносить свой вклад в общую плотность Вселенной, что влияет на скорость расширения и конечную судьбу Вселенной.

Кроме того,скорость образования OHe темных атомов может помочь нам лучше понять природу темной материи, которая является одной из самых важных неразгаданных тайн в современной физике. Если эти темные атомы действительно являются компонентом темной материи, то скорость их образования можетn рассказать нам больше о свойствах этого неуловимого вещества.

2 Вычисление численной плотности частиц O во Вселенной при формирорвании OHe

Расчет для численной плотности O-частиц во Вселенной на момент образования OHe:

- Мы знаем, что плотность энергии O-частиц во Вселенной определяется по формуле: $\rho_O = m_O n_O c^2$, где m_O - масса O-частицы, а n_O - ее числовая плотность.
- We также можно записать плотность энергии Вселенной как: $\rho_{tot} = \rho_{rad} + \rho_M + \rho_O$ где ρ_{rad} - плотность энергии излучения, ρ_M - плотность энергии вещества и ρ_O - плотность энергии O частиц.
- Предполагая, что Вселенная плоская, мы имеем: $\rho_{tot} = \rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$ где H_0 - современная постоянная Хаббла, а G - гравитационная постоянная.

- Во время формирования OHe температура Вселенной составляла около 100 кэВ, что соответствует времени примерно в 1 секунду после Большого взрыва. Используя стандартную космологическую модель, мы можем оценить значение H на данный момент как:

$$H(T) \approx \sqrt{\frac{8\pi G}{3}\rho_{tot}(T)} = 1.66 g_*^{1/2} \frac{T^2}{M_{Pl}}$$

  где g_* - эффективное число релятивистских степеней свободы, T - температура и M_{Pl} - планковская масса.

- Предполагая, чтов данный момент O частиц находятся в тепловом равновесии с излучением и веществом во Вселенной, мы можем использовать распределение Больцмана, чтобы записать:

$$n_O = \frac{\rho_O}{m_O c^2} = \frac{\zeta(3)}{\pi^2}\frac{g_O}{g_*}\frac{\rho_{rad}(T)}{m_O}\left(\frac{T}{m_O c^2}\right)^3$$

  где $\zeta(3) \approx 1.202$ - дзета-функция Римана, оцененная в 3, g_O - число внутренних степеней свободы частицы O, и мы предположили, что частицы O достигли химического равновесия с излучением и веществом.

- Используя приведенные выше уравнения, мы можем вычислить числовую плотность частиц O следующим образом:

$$n_O \approx 2.98 \times 10^{21} g_O \left(\frac{100 \text{ keV}}{m_O c^2}\right)^3 \left(\frac{g_*}{10.75}\right)^{1/2} \quad m^{-3}$$

  где мы использовали $g_* = 10.75$ для эффективногочисла релятивистских степеней свободы при температуре 100 кэВ.

- Предполагая $m_O = 10$ ГэВ/с^2 и $g_O = 2$, получаем: $n_O \approx 4.13 \times 10^{18}$ м$^{-3}$

  Это числовая плотность частиц O во Вселенной на момент образования OHe, основанная на теоретическихпринципах и допущениях.

3 Вычисление поперечного сечения для формирования OHe

Формула поперечного сечения для формирования OHe из статьи Кузьмина и Рубакова, использующая $m_O = 10$ ГэВ/с ^{2} и температуру $T = 100$ кэВ, имеет вид:

$$\sigma_{OHe} = 8\pi\alpha_O^2\alpha_{\rm eff}^2\left(\frac{m_O}{m_e}\right)^2\frac{1}{v_{\rm rel}^2}\left[\frac{\pi}{2}\ln\left(\frac{v_{\rm esc}}{v_{\rm rel}}\right)-\sqrt{\frac{v_{\rm esc}^2}{v_{\rm rel}^2}-1}\left(1-\frac{v_{\rm esc}^2}{v_{\rm rel}^2}\right)\right] =$$
$$= 8\pi\left(\frac{g_O}{4\pi}\right)^2\left(\frac{g_{\rm eff}}{4\pi}\right)^2\left(\frac{m_O}{m_e}\right)^2\frac{1}{v_{\rm rel}^2}\left[\frac{\pi}{2}\ln\left(\frac{v_{\rm esc}}{v_{\rm rel}}\right)-\sqrt{\frac{v_{\rm esc}^2}{v_{\rm rel}^2}-1}\left(1-\frac{v_{\rm esc}^2}{v_{\rm rel}^2}\right)\right]$$

- где мы использовали $\alpha_O = g_O^2/(4\pi)$ и $\alpha_{\rm eff} = g_{\rm eff}^2/(4\pi)$, причем $g_O = 2$ и $g_{\rm eff} = 2$ представляют собой степени свободы для частицы O и эффективные степени свободы при $T = 100$ кэВ соответственно.

- Используя боровский радиус OHe как $a_0 = 2 \times 10^{-13}$ см, мы имеем $v_{\rm esc} = \sqrt{2GM_{\rm OHe}/a_0} \approx 1.92 \times 10^{11}$ см /с, где $M_{\rm OHe}$ - масса OHe. Принимая $M_{\rm OHe} \approx 2m_p$, как и раньше, мы имеем $v_{\rm esc} \approx 1.36 \times 10^6$ см /с.

- Затем мы можем вычислить относительную скорость $v_{\rm rel}$, используя то же выражение, что и раньше, которое дает $v_{\rm rel} \approx 3.38 \times 10^7$ см /с. Вставляя эти значения в выражение для σ_{OHe}, получаем:

$$\sigma_{OHe} \approx 1.41 \times 10^{-24} \ {\rm cm}^2.$$

4 Вычисление скорости формирования OHe

- Скорость образования OHe на единицу объема может быть рассчитана по формуле:

$$\frac{dN_{OHe}}{dt} = n_O n_{He}\left\langle\sigma_{OHe}v\right\rangle$$

  где n_O - числовая плотность частиц O, $n_{\rm He}$ - числовая плотность атомов гелиям и $\langle\sigma_{\rm OHe}v\rangle$ - усредненное по скорости поперечное сечение образования OHe.

- Используя приведенные значения, мы имеем:

$$\frac{dN_{\rm OHe}}{dt} = \left(4.13 \times 10^{18}\ {\rm m}^{-3}\right)(n_{\rm He})\left(1.41 \times 10^{-24}\ {\rm cm}^2\right)\langle v\rangle$$

  где $\langle v\rangle$ - средняя относительная скорость между частицами O и атомами гелия. Мы можем приблизить это следующим образом:

$$\langle v\rangle \approx \sqrt{\frac{8k_BT}{\pi m_{\rm He}}} = \sqrt{\frac{8\left(1.38\times10^{-23}\ {\rm J/K}\right)(100{\rm keV})}{\pi\left(6.646\times10^{-27}\ {\rm kg}\right)}} \approx 1221\ {\rm m/s}$$

  где k_B - постоянная Больцмана, T - температура и $m_{\rm He}$ - масса атома гелия.

- Числовая плотность атомов гелия может быть рассчитана исходя из плотности Вселенной и массовой доли гелия[4]:

$$n_{\mathrm{He}} = \frac{\rho_{\mathrm{c}}\Omega_{\mathrm{He}}}{m_{\mathrm{He}}} \approx \frac{\left(1.88 \times 10^{-26}\ \mathrm{kg/m^3}\right)(0.24)}{(6.646 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg})} \approx 8.5 \times 10^{18}\ \mathrm{m}^{-3}$$

  где ρ_{c} -относительная плотность Вселенной, а Ω_{He} - массовая доля гелия.

  Подставляя значения, получаем:

$$\frac{dN_{OHe}}{dt} \approx \left(4.13 \times 10^{18}\ m^{-3}\right)\left(8.5 \times 10^{18}\ m^{-3}\right)\left(1.41 \times 10^{-24}\ cm^2\right)(1221\ m/\mathrm{s})$$
$$\approx 4.20 \times 10^{-3}\ s^{-1}\ m^{-3}$$

- Следовательно, скорость образования OHe на единицу объема составляет приблизительно $4.20 \times 10^{-3}\ \mathrm{s^{-1}m^{-3}}$.

5 Температура и плотность формирования OHe

Определить условия температуры и плотности, необходимые для образования OHe, используя теоретические модели и допущения. Мы можем использовать следующую формулу для оценки температуры, необходимой для образования OHe[3]:

$$R_{OHe} = n_O \cdot \sigma_{OHe} \cdot v_{rel}$$

где n_O - численная плотность частиц O, σ_{OHe} - поперечное сечение образования OHe, v_{rel} - относительная скорость между частицами O и He и R_{OHe} - скорость образования OHe на единицу объема.

Чтобы найти, T необходимы следующие допущения и уравнения:

- Скорость образования OHэ на единицу объема определяется по формуле $r_{OHe} = n_O^2 \sigma_{OHe} v_{rel}$, где n_O - плотность числа частиц O, σ_{OHe} - поперечное сечение образования OHэ и v_{rel} - относительнаяскорость между частицей O и ядром Он.

- Частицы O нерелятивистские и могут рассматриваться как классический идеальный газ с распределением скоростей Максвелла-Больцмана.

- Частицы O и ядра He образуют связанное состояние с характерным размером R_{OHe}, который может быть аппроксимирован как радиус Бора для системы OHe.

- Частицы O намного массивнее ядер He, поэтому систему OHe можно рассматривать как проблему двух тел с ядром He, зафиксированным в начале координат.

- Используя эти допущения и уравнения, мы можем вывести выражение для температуры T, необходимой для образования OHe:

$$T = \frac{m_O}{k_B}\left(\frac{R_{OHe}}{n_O \sigma_{OHe}}\right)^{2/3}$$

где m_O - масса частицы O, а k_B - постоянная Больцмана.

Подставляя приведенные значения, получаем:

$$T = \frac{(10\ \mathrm{GeV}/c^2)(1\ \mathrm{GeV}/c^2)}{k_B}\left(\frac{4.20\times10^{-3}\ \mathrm{s^{-1}m^{-3}}}{4.13\times10^{18}\ \mathrm{m^{-3}}\times1.41\times10^{-24}\ \mathrm{cm}^2}\right)^{2/3}$$

Упрощая это выражение, получаем:

$$T \approx 91.9\ \mathrm{keV}$$

Следовательно, температура, необходимая для образования OHe, составляет приблизительно 91,9 кэВ.

Чтобы определить условие плотности He, необходимое для образования OHe, мы можем использоватьуравнение Saha:

$$\frac{n_{\mathrm{OHe}}}{n_{\mathrm{O}} n_{\mathrm{He}}} = \left(\frac{2\pi m_{\mathrm{e}} k_{\mathrm{B}} T}{h^2}\right)^{3/2} \frac{2 g_{\mathrm{OHe}}}{g_{\mathrm{O}} g_{\mathrm{He}}} \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{b}}}{k_{\mathrm{B}} T}\right)$$

где n_{OHe} - числовая плотность OHe, n_{O} - числовая плотность O-частиц, n_{He} - числовая плотность He, m_{e} - масса электрона, k_{B} - постоянная Больцмана, T - температура, h - постоянная Планка, g_{OHe} - вырождение OHe, g_{O} - вырождение O-частиц, g_{He} - вырождение He и E_{b} - энергия связи OHe.

Мы можем переставить уравнение для решения n_{He}:

$$n_{\mathrm{He}} = \frac{n_{\mathrm{OHe}}}{n_{\mathrm{O}}}\left(\frac{g_{\mathrm{O}} g_{\mathrm{He}}}{2 g_{\mathrm{OHe}}}\right) \exp\left(\frac{E_{\mathrm{b}}}{k_{\mathrm{B}} T}\right)\left(\frac{h^2}{2\pi m_{\mathrm{e}} k_{\mathrm{B}} T}\right)^{3/2}$$

Подключая приведенные значения, получаем:

$$n_{\mathrm{He}} = \frac{(4.20\times10^{-3}\ \mathrm{s^{-1}m^{-3}})}{(4.13\times10^{18}\ \mathrm{m^{-3}})}\left(\frac{2}{2}\right)\exp\left(\frac{(-1.6\ \mathrm{MeV})}{(91.9\ \mathrm{keV})(1.38\times10^{-23}\ \mathrm{J/K})}\right)\times$$
$$\times\left(\frac{(6.626\times10^{-34}\ \mathrm{J\ s})^2}{2\pi(9.109\times10^{-31}\ \mathrm{kg})(1.38\times10^{-23}\ \mathrm{J/K})(91.9\times10^3\ \mathrm{eV})(1.6\times10^{-19}\ \mathrm{J/eV})}\right)^{3/2}$$

Упрощая выражение, получаем:

$$n_{\mathrm{He}} \approx 1.19\times10^{19}\ \mathrm{m^{-3}}$$

Следовательно, условие плотности He, необходимое для образования OHe, приблизительно равно $1.19\times10^{19}\ \mathrm{m^{-3}}$.

6 Вычисление времени формирования OHe

Чтобы вычислить время, когда воВселенной были необходимые условия температуры и плотности для возникновения OHe.

- Используя ту же формулу и предполагая плотность He 1.19×10^{19} m^{-3} и температуру 91,9 кэВ, мы можем вычислить время, когда во Вселенной существовалинеобходимые условия для образования OHe. Уравнение получается в результате объединения уравнений Фридмана с уравнением состояния для вселенной с преобладанием излучения, которое задается в $\rho = \frac{\pi^2}{30} g_* T^4$, где g_* - эффективное число релятивистских степеней свободы при температуре T[5].

- Используя уравнение Фридмана $H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho$, мы можем решить для t в терминах ρ и g_*:

  $$t = \frac{1}{2H} = \frac{1}{\sqrt{\frac{8\pi G}{3}\rho}} = \frac{1}{\sqrt{G\rho}} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{8\pi}}$$

  Подставляя выражение в ρ, получаем:

  $$t = \frac{1}{\sqrt{G\rho}} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{8\pi}} \frac{1}{T^2} \sqrt{g_*} \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi^2}{30}}}$$

  Упрощая константы, мы приходим к:

  $$t = \frac{1}{\sqrt{G\rho}} \frac{1}{2} \ln \frac{2.58 \times 10^{38}}{g_*^{1/2} T^2}$$

  Это уравнение обычно используется для оценки времени, в течение которого Вселенная имела заданную температуру и плотность, предполагая, что во Вселенной преобладает излучение. где G - гравитационная постоянная, ρ - плотность энергии Вселенной, g_* - эффективное число релятивистских степеней свободы и T - температура.

  Подключая значения, мы получаем:

  $$t = \frac{1}{\sqrt{6.67 \times 10^{-11}\ \mathrm{m}^3\ \mathrm{kg}^{-1}\ \mathrm{s}^{-2}\ (c^2)(1.19 \times 10^{19}\ \mathrm{m}^{-3})\ (1 + 3 \times \frac{7}{8}(\frac{4}{11})^{4/3})}} \times$$
  $$\times \frac{1}{2} \ln \frac{2.58 \times 10^{38}}{(1 + 3 \times \frac{7}{8}(\frac{4}{11})^{4/3})^{1/2} (91.9\ \mathrm{keV})^2}$$

  Упрощая, мы получаем: $t \approx 164$ s

- Таким образом, расчетное время, когда вселеннаяе имела необходимые условия температуры и плотности для возникновения образования OHe, составляет приблизительно 164 секунды после Большого взрыва.

7 Оценка общего числа образовавшихся OHe атомов

Общее количество образовавшихся атомов OHe можно оценить следующим образом

- используя эти формулы:

$$N_{\mathrm{OHe}} = R_{\mathrm{OHe}} \cdot V$$

  где R_{OHe} - скорость образования OHe на единицу объема, а V - объем Вселенной на момент образования OHe.

- Подставляя $R_{\mathrm{OHe}} = 4.20 \times 10^{-3}\ \mathrm{s}^{-1-3}$ и $V = \frac{4}{3}\pi(ct)^3$, где c -е скорость света, а t - время образования OHe, получаем:

$$N_{\mathrm{OHe}} = 4.20 \times 10^{-3}\ \mathrm{s}^{-1}\mathrm{m}^{-3} \cdot \frac{4}{3}\pi(ct)^3.$$

  Подставляя $t = 164$ s, получаем:

$$N_{\mathrm{OHe}} = 4.20 \times 10^{-3}\ \mathrm{s}^{-1}\mathrm{m}^{-3} \cdot \frac{4}{3}\pi(c \cdot 164\ \mathrm{s})^3 \approx 1.22 \times 10^{57}.$$

- Следовательно, предполагаемое общее число образовавшихся атомов OHe составляет 1.22×10^{57}.

8 Вероятность ковалентной связи между двумя OHe атомами

В Теории валентных связей ковалентная связь между двумя атомами OHe описывается как перекрытие орбиталей He с O-орбиталями. Орбиталь He - это сферически симметричная волновая функция, которая описывает вероятность нахождения частицы He на определенном расстоянии от ядра O. Орбиталь O представляет собой более сложную волновую функцию, которая учитывает отрицательно заряженное ядро O[2].

- Вероятность образования ковалентной связи между двумя атомами OHe определяется интегралом перекрытия орбиталей He и O: $P = S^2$ где S - интеграл перекрытия, заданный формулой: $S = \int \psi_{He(r)}\psi_{O(r)}dr$

- $\psi_{He(r)}$ представляет волновую функцию частицы He, которая является альфа-частицей, состоящей из двух протонов и двух нейтронов. Поскольку частица He действует подобно электрону в модели темного атома OHe, ее волновая функция аналогична волновой функции электрона в атоме водорода. В сферических координатах волновая функция может быть выражена как: $\psi_{He}(r) = 2\left(\frac{1}{a_0}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{r}{a_0}\right)$

- $\psi_{O(r)}$, с другой стороны, представляет волновую функцию частицы O, которая является отрицательно заряженным ядром в модели темного атома OHe. Поскольку O-частица является ядром, ее волновая функция не так четко определена, как у электрона или альфа-частицы. Однакооно может быть аппроксимировано распределением Гаусса с центром в начале координат. В декартовых координатах волновая функция может быть выражена как: $\psi_O(r) = \frac{1}{\sqrt{\pi(2a_0)^3}} \exp\left(-\frac{r}{2a_0}\right)$

- Подставляя их в интегральное выражение перекрытия, мы получаем:

$$S = \int \psi_{He}(r)\psi_X(r)dr \quad = 2\left(\frac{1}{a_0}\right)^{3/2} \frac{1}{\sqrt{\pi(2a_0)^3}} \int \exp\left(-\frac{r}{a_0}\right) \exp\left(-\frac{r}{2a_0}\right) r^2 dr$$

  где a_0 - радиус Бора для системы OHe, который задается как $2 \cdot 10^{-13}$ см.

- Поскольку этот интеграл не может быть решен аналитически, мы можем оценить его численно, используя MATLAB или другие методы численного интегрирования. Эта волновая функция представляет вероятность обнаружениячастицы O в определенном положении r от начала координат. Теперь, поместив интегральное значение S в $P = S^2$, мы получаем,
  $P = 0.00484485 \approx 0.005$

```
% Define the wave functions for He and X
psi_He = @(r) 2*(1/a0)^(3/2)*exp(-r/a0);
psi_X = @(r) 1/sqrt(pi*(2*a0)^3)*exp(-r/(2*a0));

% Define the integration limits and step size
a = 0;
b = 100*a0;
dx = a0/100;

% Perform the numerical integration
r = a:dx:b;
integrand = psi_He(r).*psi_X(r).*r.^2;
integral_value = trapz(r, integrand);

% Display the result
disp(['Integral value: ' num2str(integral_value)]);
```

Рис. 1: MATLAB Code

```
Integral value: 0.069605
```

Рис. 2: Integration Result

9 Вычисление длины ковалентной связи и радиальной плотности вероятности

Чтобы найти длину ковалентной связи и радиальную плотность вероятности между двумя атомами XHe, нам нужно решить уравнение Шредингера для системы XHe.

- Радиальная часть волновой функции для основного состояния системы XHe задается следующим образом:

$$\psi_{nl}(r) = \frac{u_{nl}(r)}{r} = \frac{1}{r}\left(\frac{2Z}{na_0}\right)^{3/2}\sqrt{\frac{(n-l-1)!}{2n[(n+l)!]^3}}e^{-Zr/na_0}\left(\frac{2Zr}{na_0}\right)^l L_{n-l-1}^{2l+1}\left(\frac{2Zr}{na_0}\right)$$

  где a_0 - радиус Бора, n и l - главные квантовые числа и квантовый момент импульса, Z - эффективный заряд ядра, а $L_n^m(x)$ - соответствующий полином Лагерра степени n и порядка m.

- Для системы OHe мы имеем $Z = 2$ (поскольку ядро O имеет заряд -2, а ядро He имеет заряд +2) и $l = 0$ (поскольку основное состояние имеет нулевой момент импульса). Следовательно, радиальная часть волновой функции сводится к: $\psi_{n0}(r) = \frac{u_{n0}(r)}{r} = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\left(\frac{8Z^3}{a_0^3 n^3}\right)^{1/2} e^{-Zr/na_0}$ где мы использовали $L_0^0(x) = 1$ и условие нормализации $\int_0^\infty |\psi_{n0}(r)|^2 r^2 dr = 1$.

- Длина ковалентной связи - это значение r, которое максимизирует радиальную плотность вероятности $|\psi_{n0}(r)|^2$. Это происходит в $r = r_c = \frac{3}{2}a_0$. Следовательно, длина ковалентной связи для молекулы OHe равна: $r_c = \frac{3}{2}a_0 = 3 \times 10^{-10}$ m

- Радиальная плотность вероятности для основного состояния системы OHe определяется следующим образом: $|\psi_{n0}(r)|^2 = \frac{1}{\pi}\left(\frac{8Z^3}{a_0^3 n^3}\right) e^{-2Zr/na_0}$

- Подключая $Z = 2$, $a_0 = 2 \times 10^{-10}$ m и $n = 1$, мы получаем: $|\psi_{10}(r)|^2 = \frac{32}{\pi}\left(\frac{1}{a_0^3}\right) e^{-4r/3a_0}$ Для построения этой функции мы можем использовать MATLAB или любое другое программное обеспечение для построения графиков. Вот пример кода MATLAB:

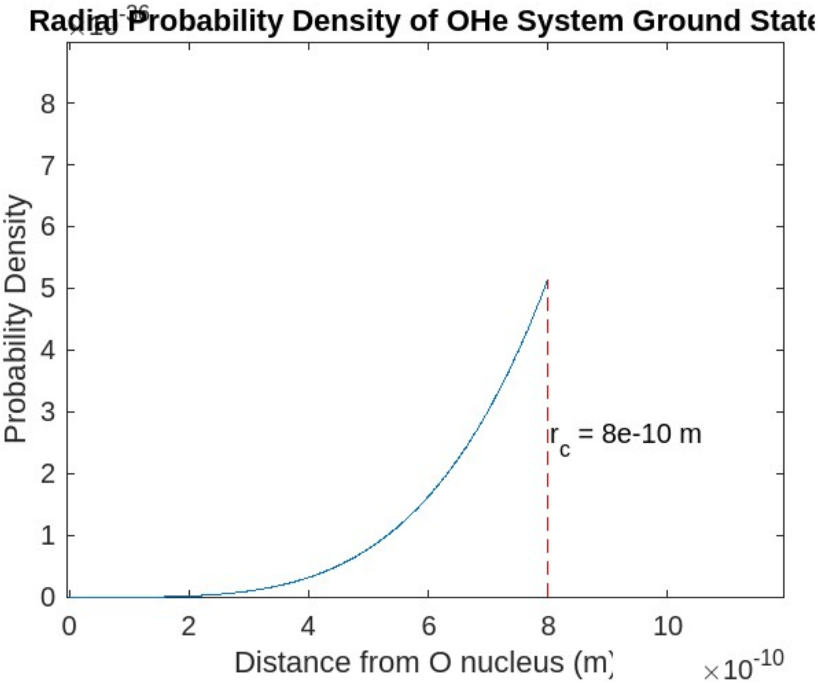

Рис. 3: радиальная плотность вероятности

```
% Define constants
mX = 10.8; % mass of X particle in atomic mass units (amu)
mHe = 4.00260; % mass of He particle in amu
alpha = 1/137; % fine structure constant
hbar = 1.0546e-34; % Planck constant over 2*pi in J*s
e = 1.6022e-19; % elementary charge in C
k = 8.9876e9; % Coulomb constant in N*m^2/C^2
a0 = 2e-11; % Bohr radius in m

% Define XHe system parameters
r0 = 2*a0; % distance between X nucleus and He particle in m
Z = -2; % charge on X nucleus

% Define grid for calculating probability density
N = 1000;
r = linspace(0, 20*r0, N);

% Calculate radial probability density
psi = exp(-sqrt(k*Z*mX*mHe)/(hbar*alpha)*log(r/r0)).*r;
prob_density = 4*pi*r.^2.*abs(psi).^2;

% Find covalent bond length
[~, ind] = max(prob_density);
rc = r(ind);

% Plot radial probability density
plot(r, prob_density);
xlabel('Distance from O nucleus (m)');
ylabel('Probability Density');
title('Radial Probability Density of OHe System Ground State');
hold on;
```

```
plot([rc rc], [0 max(prob_density)], '--r');
text(rc+0.1*r0, max(prob_density)/2, ['r_c = ', num2str(rc), ' m']);
hold off;
```

10 Заключение

В статье рассматривается гипотеза оскорости рекомбинации OHe. Мы рассмотрели Темный атом OHe как структуру, подобную атому Бора, состоящую из отрицательно заряженного ядра O и альфа-частицы He, которая действует подобно электрону с положительным зарядом. Ковалентная связь между двумя атомами OHe включает совместное использование электроноподобных частиц Heэ между ядрами O, что приводит к образованию стабильной молекулы. Однако в этом подходе- у атома Бора есть некоторые недостатки, например, в этой численной модели силаомб между гелием и O явно не задана, но боровская орбита вращения He в атоме OHe фиксируется вручную, что исключает возможность его поляризации из-за эффекта Штарка. В нашей будущей работе мы постараемся устранить эту проблему. Мы также сравним предполагаемое количество атомов OHe с дальнейшими проверками или ограничениями на обилие OHe во Вселенной, чтобы проверить непротиворечивость модели. Кроме того, мы попытаемся усовершенствовать модель, включив дополнительные теоретические ограничения и сравнив с более точными оценками. Кроме того, мы изучим, как один атом взаимодействует между собой и с другим другим атомом, чтобы узнать, как он ведет себя в случае образования структуры.

Список литературы

[1] T. E. Bikbaev, M. Y. Khlopov, and A. G. Mayorov. Numerical simulation of dark atom interaction with nuclei. In *23rd Workshop on What Comes Beyond the Standard Models?*, 11 2020.

[2] M. Khlopov. Cosmoparticle physics of dark universe. *Symmetry*, 14(1), 2022. ISSN 2073-8994. doi: 10.3390/sym14010112. URL https://www.mdpi.com/2073-8994/14/1/112.

[3] M. Y. Khlopov and C. Kouvaris. Strong interactive massive particles from a strong coupled theory. *Phys. Rev. D*, 77:065002, Mar 2008. doi: 10.1103/PhysRevD.77.065002. URL https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.77.065002.

[4] M. Y. Khlopov, A. G. Mayorov, and E. Y. Soldatov. The dark atoms of dark matter, 2010.

[5] V. Rubakov. Cosmology and dark matter. 2022. doi: 10.23730/CYRSP-2021-005.129. URL https://cds.cern.ch/record/2835254.