



# **Образование аномальных изотопов в небесных телах в модели темных атомов**

Научный руководитель — Хлопов Максим Юрьевич

Студент — Журавлева Анна Сергеевна

Природа скрытой массы во Вселенной до сих пор остаётся открытым вопросом. Один из возможных ответов даёт модель **тёмных атомов**, которая может быть связана с составной природой бозона Хиггса и позволяет объяснить парадоксальные результаты прямого поиска частиц скрытой массы, в частности положительный результат эксперимента **DAMA/LIBRA**.

В этой модели рассматриваются гипотетические стабильные или практически стабильные частицы  $X^{-2n}$  с зарядом  $-2ne$ . Такие частицы могут образовывать связанные состояния с ядрами барионного вещества ( $NX^{-2n}$ ), которые называются **«тёмными атомами»**.

Такие кандидаты на роль частиц скрытой массы являются ядерно взаимодействующими, при попадании в достаточно плотное и достаточно протяженное барионное вещество они должны тормозиться, гравитационно захватываться и накапливаться внутри астрофизических объектов: звезд, планет и малых космических объектов.

Взаимодействие темных атомов с ядрами вещества может приводить к переносу частицы  $X^{-2n}$  на другие ядра и образованию связанных состояний, которые химически проявляются как аномально тяжелые изотопы соответствующих элементов, например, железа.

**Цель работы** - построить методическую оценочную модель захвата и торможения свободных частиц в звёздах, а также модель термализации и последующего накопления тёмных атомов в астрофизических объектах, проанализировать условия, при которых взаимодействие тёмных атомов с ядрами барионного вещества может приводить к образованию аномально тяжёлых изотопов.

## Задачи:

1. Для разработки методики расчётов рассмотреть предельный методический случай свободной заряженной частицы  $X^{\{-2n\}}$  в звёздной плазме.
2. В рамках этой методической модели оценить транспортные сечения, длины свободного пробега, число столкновений и условие гравитационного захвата частицы в веществе звезды.
3. Провести расчёт для Солнца проверить, является ли солнечная среда эффективной для торможения и захвата частицы. Сравнить эффективность торможения и захвата для звёзд различных классов: Солнца, Проксимы Центавра, Арктика и Сириуса В.
4. Перейти к случаю связанного состояния и оценить длину свободного пробега, число столкновений, длину и время термализации в солнечной среде.
5. Построить кинетическую модель дальнейшей эволюции захваченных темных атомов, учитывающую возможность переноса частиц  $X^{\{-2n\}}$  на другие ядра вещества.
6. Показать, что после захвата в планетарной части, необходимо определить, где именно будут накапливаться тёмные атомы.
7. Оценить распределение захваченных тёмных атомов внутри Земли после термализации..

## 1. Экспериментальное ограничение на массу

Поиск многозарядных частиц на Большом адронном коллайдере даёт нижний предел на массу таких частиц. В работе принимается оценка:

$$m_X \gtrsim 1-2 \text{ TeV}$$

Поэтому Тэвный масштаб рассматривается как минимальный характерный масштаб массы тёмного атома.

## 2. Космологическое ограничение на концентрацию

Если частицы  $X^{\{-2n\}}$  или ТА ( $NX^{\{-2n\}}$ ) стабильны и не связываются в нейтральные ТА, их концентрация должна быть малой:

$$\frac{n_X}{n_b} \lesssim 10^{-9} - 10^{-10}$$

## 3. Выбранные массы для расчётов

В расчётах используются три характерных значения:

$$m_X = 1 \text{ TeV}, \quad m_X = 10 \text{ TeV}, \quad m_X = 10^{10} \text{ GeV}$$

# Расчет для свободной заряженной частицы $X^{-2n}$ в звездной плазме

## 1. Скорость частицы у поверхности звезды

$$v = \sqrt{u^2 + v_{\text{esc}}^2} \quad v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM_\star}{R_\star}}$$

## 2. Концентрации частиц в плазме

$$n_p = \frac{X_{\text{H}\rho}}{m_p} \quad n_\alpha = \frac{Y_{\text{He}\rho}}{4m_p} \quad n_e = n_p + 2n_\alpha$$

## 3. Дебаевская длина

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T}{n_e e^2}}$$

## 4. Транспортное кулоновское сечение

$$\sigma_{\text{tr},i} = \int (1 - \cos \theta) \frac{d\sigma_i}{d\Omega} d\Omega \quad \sigma_{\text{tr},i} \simeq 4\pi b_{0,i}^2 \ln \Lambda_i$$

$$b_{0,i} = \frac{|Z_X Z_i| e^2}{4\pi \epsilon_0 \mu_i v^2} \quad \ln \Lambda_i = \ln \left( \frac{\lambda_D}{b_{0,i}} \right)$$

## 5. Длина свободного пробега

$$\lambda_i = \frac{1}{n_i \sigma_{\text{tr},i}}$$

## 6. Число столкновений

$$N_i \simeq n_i \sigma_{\text{tr},i} L$$

## 7. Условие гравитационного захвата

$$\Delta E_{\text{req}} = \frac{1}{2} m_X u^2$$

## 8. Потеря энергии в одном столкновении

$$N_{\text{req}} \sim \frac{\Delta E_{\text{req}}}{\Delta E_i}$$

## 9. Эффективное сечение захвата звезды

$$\sigma_{\text{eff}} = \pi R_\star^2 \left( 1 + \frac{v_{\text{esc}}^2}{u^2} \right)$$

# Вывод для Солнца и сравнение звёзд различных классов

## Эффективное сечение захвата Солнцем

$u$ , км/с	$1 + v_{esc}^2/u^2$	$\sigma_{eff}$ , м <sup>2</sup>
300	5.24	$7.97 \cdot 10^{18}$

Солнечная плазма является непрозрачной средой. При прохождении через Солнце частица испытывает чрезвычайно большое число тормозящих столкновений с протонами и ядрами гелия. Требуемая для захвата потеря энергии существенно меньше той, которая может быть обеспечена взаимодействием с солнечным веществом. Поэтому во всем рассматриваемом диапазоне масс свободная частица  $X^{2n}$  должна эффективно тормозиться и гравитационно захватываться Солнцем.

Объект	Основные ядра	Характерная $\lambda$ , м	$N_{tr}$	$\sigma_{eff}$ , м <sup>2</sup>
Солнце	p, $\alpha$	$10^{-7} - 10^{-6}$	$1.43 \cdot 10^{16}$	$7.97 \cdot 10^{18}$
Проксима Центавра	p, $\alpha$	$10^{-9} - 10^{-8}$	$1.15 \cdot 10^{17}$	$1.38 \cdot 10^{17}$
Арктур	p, $\alpha$	$10^{-5} - 10^{-3}$	$1.32 \cdot 10^{15}$	$1.16 \cdot 10^{21}$
Сириус В	C, O	$10^{-8}$	$6.97 \cdot 10^{14}$	$5.43 \cdot 10^{16}$

Во всех рассмотренных случаях выполняется условие  $\lambda \ll R_*$  и  $N_{tr} \gg 1$ . Это означает, что в модели свободной частицы звезды разных классов являются непрозрачной средой и должны эффективно тормозить такие частицы. Отличие между объектами проявляется в масштабе эффективного сечения захвата и в физических условиях дальнейшей эволюции захваченных состояний.

## 1. Связное состояние термализуется внутри Солнца

(для всех выбранных масс выполняется)

$m_\chi$	$L_{\text{th}}, \text{M}$	$t_{\text{th}}, \text{c}$
1 TeV	$4.6 \cdot 10^1$	$6.9 \cdot 10^{-5}$
10 TeV	$4.6 \cdot 10^2$	$6.9 \cdot 10^{-4}$
$10^{10}$ GeV	$4.6 \cdot 10^8$	$6.9 \cdot 10^2$

$$L_{\text{th}} < R_\odot$$

## 2. Популяционная эволюция ТА и аномальных изотопов

Взаимодействие ТА с ядрами вещества может приводить к переносу частицы на другие ядра и образованию связанных состояний, которые химически проявляются как аномально тяжелые изотопы.

Кинетическая модель

$$\frac{dN_{\text{in}}}{dt} = C_{\text{in}} - \frac{N_{\text{in}}}{t_{\text{th}}} - \Gamma_{\text{in,loss}} N_{\text{in}}$$

$$\frac{dN_A}{dt} = \frac{N_{\text{in}}}{t_{\text{th}}} - \sum_k \Gamma_{A \rightarrow k} N_A - \Gamma_{A,\text{loss}} N_A$$

$$\frac{dN_k}{dt} = \Gamma_{A \rightarrow k} N_A - \Gamma_{k,\text{loss}} N_k$$

# ЗЕМЛЯ: ЗАХВАТ, ОСЕДАНИЕ И НАКОПЛЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ

1. Эффективное сечение захвата Землей  $\sigma_{\oplus} \simeq \pi(6.371 \cdot 10^6)^2 \simeq 1.28 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$

2. Поток ТА на Землю  $\Phi_A = n_{A,\infty} v$

3. Темп захвата  $N_A(t) \simeq C_{\oplus} t$

4. Число накопленных ТА с учетом потерь или переработок  $\frac{dN_A}{dt} = C_{\oplus} - \sum_k \Gamma_{A \rightarrow k} N_A$

Характерный радиус распределения ТА внутри Земли

Используя гауссово пространственное распределение для термализованных тёмных атомов внутри Земли,

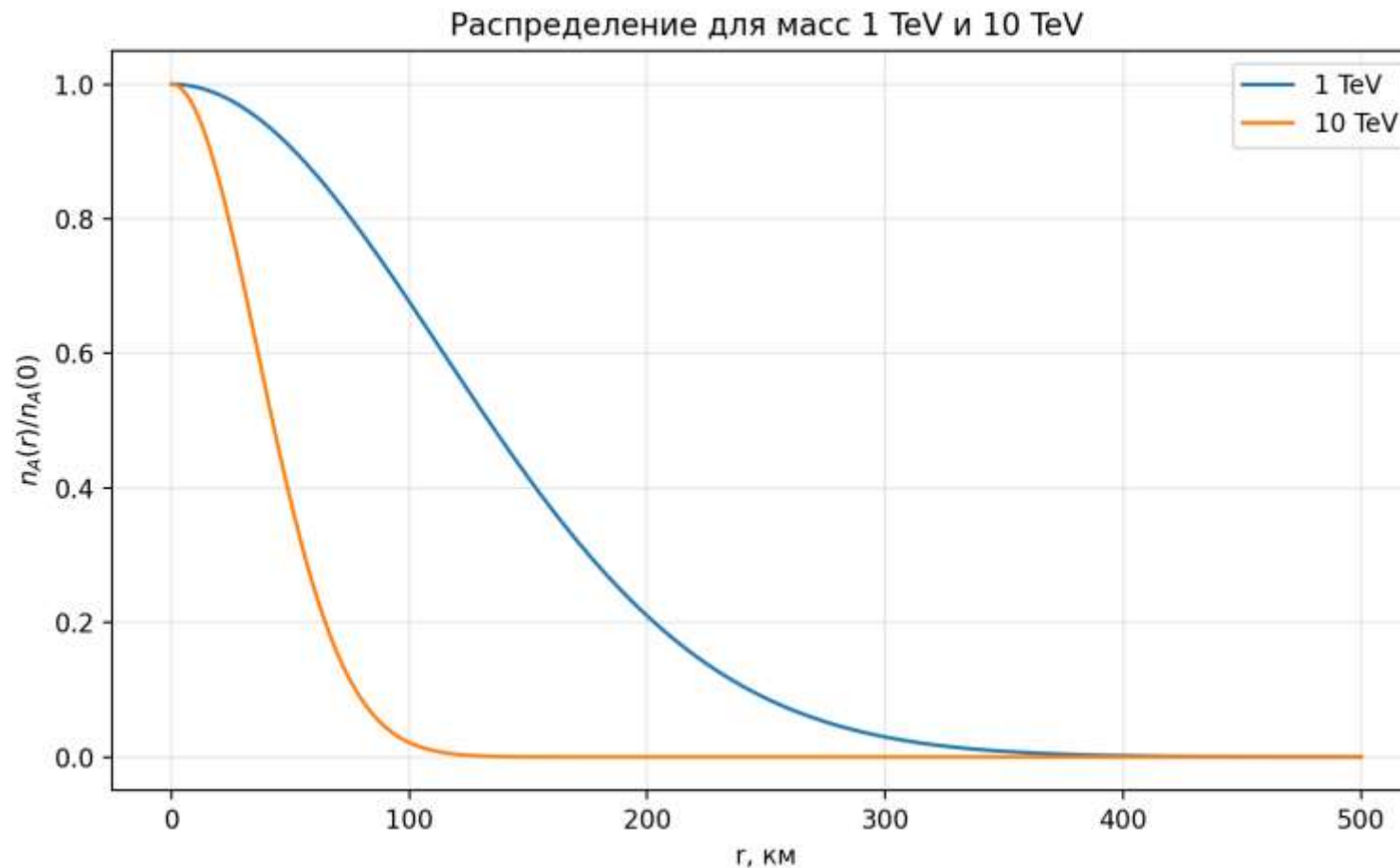
$$n_A(r) = n_A(0) \exp\left(-\frac{r^2}{r_A^2}\right)$$

можно оценить характерную область их накопления. Полученные значения  $r_A$  показывают, что для всех рассмотренных масс тёмные атомы концентрируются значительно ближе к центру Земли, чем размер внутреннего ядра:

$$r_A \ll R_{\text{вн. ядра}} \simeq 1220 \text{ км}$$

$m_X$	$r_A$ в км
1 TeV	160 км
10 TeV	51 км
$10^{10}$ GeV	51 м

# ЗЕМЛЯ: ЗАХВАТ, ОСЕДАНИЕ И НАКОПЛЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ



При увеличении массы с 1 до 10 TeV распределение ТА сужается. Более тяжёлые ТА сильнее оседают к центру Земли. Для 1 TeV характерный радиус распределения составляет около 160 км, а для 10 TeV — около 51 км. Следовательно, накопление тёмных атомов и возможных аномальных изотопов ожидается в центральной области Земли.

1. Был проведен методический расчёт для свободной частицы, он показал, что звёздная плазма эффективно тормозит такие частицы, в таблице приведены результаты для звезд различных классов
2. Получен результат, что связанное состояние успевает термализоваться в Солнце
3. Показано, что после захвата, возможно образование anomalously тяжелых изотопов в космических телах
4. Расчёт для Земли показал, что ТА концентрируются в центральной области планеты.
5. Был построен график распределения массы ТА от радиуса.

## Планы

Исследование формирования распределения концентрации в Земле и образования центрального anomalously ядра Земли



**Спасибо за внимание**

28.05.26