

Образование аномальных изотопов темных атомов в различных условиях

Отчет о научно-исследовательской работе

Басов Л.И.

Научный руководитель: д.ф-м.н М.Ю. Хлопов

30 января 2026

Введение

В этой работе рассматривается сценарий темной материи с участием гипотетически стабильных частиц X с зарядом $-2n$.

Основная идея

Целью данной работы является изучение структуры темных атомов, а также механизма образования аномальных изотопов при захвате ядер тяжелых элементов в различных условиях. Изучение проблемы, связанной с потенциально сильным взаимодействием атомов рентгеновского излучения с ядрами вещества, которое может нарушить связанное состояние темных атомов и привести к образованию аномальных изотопов.

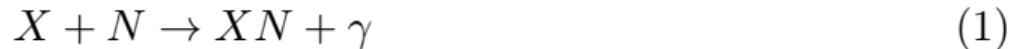
Цели:

- Изучение квантово-механической модели темных атомов.
- Рассмотрение их поведение в различных условиях.
- Исследование возможности образования аномальных изотопов.
- Расчет потока темных атомов из сверхновой.

Теоретическая часть

Одним из возможных кандидатов на роль темной материи является частица с электрическим зарядом $-2n$, которая может образовывать темные атомы, объясняющие скрытую массу Вселенной.

Система темных атомов состоит из $-2n$ заряженных частиц X (при $n = 1$ соответствует O^-) и ядра 4He , удерживаемых вместе кулоновской силой. Эта модель может объяснить парадоксы поиска частиц скрытой массы в подземных экспериментах DAMA/NaI и DAMA/LIBRA. В дополнение к стандартным реакциям нуклеосинтеза, модель темного атома предсказывает следующие процессы:



Согласно результатам, полученным в эксперименте ATLAS, нижний предел массы частицы X составляет приблизительно 1 ТэВ [1]. Конкретная конфигурация системы связанных темных атомов определяется параметром a .

Структура XHe

$$a \approx Z_\alpha Z_X \alpha A_\alpha m_p R_{n\text{He}}$$

Когда $0 < a < 1$, связанное состояние выглядит как атом Бора с отрицательно заряженной частицей в центре и ядром $n\text{He}$, движущимся по боровской орбите. Когда $1 < a < \infty$, состояние выглядит как атом Томсона, в котором $n\text{He}$ колеблется вокруг тяжелой отрицательно заряженной частицы.



Структура XN

В— изотопы образуют частицы, подобные частицам Бора;

Т— изотопы образуют частицы, подобные частицам Томсона;

Число — массовое число самой легкой частицы, подобной частице Томсона.

<i>n</i>	A					
	<i>H</i>	<i>He</i>	<i>Li</i>	<i>Be</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
1	В	4	Т	Т	Т	Т
2	4	3	Т	Т	Т	Т
3	3	Т	Т	Т	Т	Т
4	3	Т	Т	Т	Т	Т
5	2	Т	Т	Т	Т	Т

Таблица 1: Структура связанных состояний XN.

Условия взрыва сверхновой

В условиях взрыва сверхновой темные атомы X- n He могут ионизироваться и образовывать свободный многозарядный компонент X^{-2n} , который может захватываться ядрами других тяжелых элементов (таких как Fe, Ni, S) и образовывать аномальные изотопы этих элементов.

Энергия связи для атомов Бора (для случая XHe):

$$W_{X-N}^{\text{Bohr}} = 2n^2 Z^2 \alpha^2 m_N = \frac{1}{2m_N R_b^2} \quad W_{XHe} \approx 1.6 \text{ MeV}$$

Для простой оценки энергии связи атомов Томпсона мы используем механическую модель:

$$\mathcal{H} = \begin{cases} \frac{p^2}{2m_N} - \frac{3nZ\alpha}{R_N} + \frac{nZ\alpha}{R_N} \left(\frac{r}{R_N} \right)^2, & r < R_N \\ \frac{p^2}{2m_N} - \frac{2nZ\alpha}{R_N}, & r > R_N \end{cases}$$

Расчеты

$$W_{X-N}^{\text{Thomson-Glashow}} = 3 \frac{nZ\alpha}{R_N} \left(1 - \sqrt{\frac{1}{2nZ\alpha m_N R_N}} \right) = 3 \frac{nZ\alpha}{R_N} \left(1 - \sqrt{\frac{R_b}{R_N}} \right).$$

Результаты расчетов показывают, что аномальные изотопы обладают высокой энергией связи и не ионизируются в условиях взрыва сверхновой, а ускоряются и образуют поток изотопов.

n	^{56}Fe	^{59}Ni	^{28}Si	^{52}S	^{40}Ca	^{16}O
1	23,6	25,1	15,1	16,8	20	9,3
2	47,9	50,9	31,3	34,5	40,7	20
3	72,4	76,8	47,5	52,4	61,6	30,8
4	96,9	102,7	63,9	70,4	82,5	41,8
5	101,4	128,7	80,3	88,4	103,5	52,9

Таблица 2: Энергия ионизации аномальных изотопов $X^{-2n}N$ (MeV)

Расчет потока темных атомов от сверхновых

Локальная плотность тёмной материи: $\rho_{\text{DM}} \approx 0.3 \text{ ГэВ/см}^3$.

$$n_X = \frac{\rho_{\text{DM}}}{m_X} \approx 3 \times 10^{-4} \text{ см}^{-3}.$$

$$\Phi_{\text{DM}} = n_X \cdot v_{DM} \approx 6.6 \times 10^3 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}.$$

Общее число захваченных DA:

$$N_{\text{DA,cap}} = \Phi_{\text{DM}} \times \pi R_{\text{RG}}^2 \times t_{\text{RG}} \approx 2.62 \times 10^{45}$$

Содержание аномальных темных атомов в космических лучах:

$$\frac{N_{\text{DA,cap}}}{N_B} \approx 1.09 \times 10^{-13}.$$

Подставляя различные значения d:

$$\Phi(1 \text{ kpc}) \approx 22 \text{ см}^{-2}, \quad \Phi(10 \text{ kpc}) \approx 0.22 \text{ см}^{-2}$$

$$\Phi(100 \text{ pc}) \approx 2.2 \times 10^3 \text{ см}^{-2}, \quad \Phi(10 \text{ pc}) \approx 2.2 \times 10^5 \text{ см}^{-2}.$$

Аккреционные диски черных дыр

В модели тонкого аккреционного диска Шакуры–Сюняева температура имеет зависимость вида:

$$T(R) \approx \left(\frac{3GM_{\text{BH}}\dot{M}}{8\pi\sigma R^3} \right)^{1/4},$$

Для чёрной дыры звёздной массы $M_{\text{BH}} \sim 10 M_{\odot}$ характерные температуры составляют:

$$R \sim 10^9\text{--}10^{11} \text{ cm} \quad T_{\text{in}} \sim 10^7\text{--}10^8 \text{ K} \quad R \sim 3\text{--}6 R_g \sim 10^7 \text{ cm} \quad (2)$$

$$T_{\text{out}} \sim 10^4\text{--}10^6 \text{ K} \quad R \sim 10^9\text{--}10^{11} \text{ cm} \quad (3)$$

где $R_S = 2GM_{\text{BH}}/c^2$ — радиус Шварцшильда.

Для сверхмассивных чёрных дыр температура внутреннего диска ниже и составляют $T_{\text{in}} \sim 10^5 - 10^6 \text{ K}$. Это связано с более крупным радиусом аккреционного диска при сопоставимых темпах акреции с ЧД меньшей массы

Заключение

В ходе данной исследовательской работы были выполнены следующие задачи:

- Изучена теоретическая модель темного атома Боровского и Томсоновского вида.
- Проведены расчеты энергии ионизации аномальных изотопов темных атомов в случае их захвата ядрами тяжелых элементов.
- Рассчитан поток темных атомов из сверхновых.
- Рассмотрена возможность образования изотопов ТА в аккреционных дисках ЧД.

Вывод

Темные атомы действительно ионизируются при взрывах сверхновых, и захватываются ядрами тяжелых элементов, образуя аномальные изотопы элементов. Однако в условиях аккреционных дисков ЧД вероятность их образования крайне низка.

Вклад изотопов ТА в космических лучах составляет примерно $\sim 10^{-13}$.

Спасибо за внимание!

Список литературы

-  Beylin, V.A.; Bikbaev, T.E.; Khlopov, M.Y.; Mayorov, A.G.; Sopin, D.O. Universe 2024, 10, 368. Dark Atoms of Nuclear Interacting Dark Matter., Dark Atoms of Nuclear Interacting Dark Matter., 2024.
-  Cahn, R.N.; Glashow, S.L., Chemical Signatures for Superheavy Elementary Particles. , Science, 607-611, (1981), DOI: 10.1088/2041-8205/790/2/L21.
-  M. Khlopov, What comes after the Standard Model?, Progress in Particle and Nuclear Physics, Volume 116, (2021), ISSN 0146-641