

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

УДК 539.165.2

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ
МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ ПОТОКОВ
МНОГОЗАРЯДНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТЕМНЫХ
АТОМОВ

Научный руководитель
Профессор, д.ф.-м.н.

_____ М. Ю. Хлопов

Студент

_____ Л. И. Басов

Москва 2025

Содержание

Введение	3
1 Структура темных атомов	4
2 Испарение черных дыр	6
3 Образование аномальных изотопов темных атомов	7
4 Заключение	8

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее актуальных проблем современной физики элементарных частиц и космологии является природа темной материи (ТМ), которая составляет более 85 процентов массы Вселенной. Несмотря на множество косвенных свидетельств её существования, полученных из наблюдений крупномасштабной структуры Вселенной, динамики галактик и гравитационного линзирования, фундаментальные свойства ТМ остаются неизвестными.

Их объяснение выходит за рамки стандартной модели, существующей сегодня, и развивается в двух направлениях: теория гравитации и расширение Стандартной Модели взаимодействий элементарных частиц за счет существования новых стабильных частиц темной материи[1]. В данной работе основное внимание уделяется сценарию темного атома — связанного состояния нового тяжелого лептона $X^- 2n$ и n ядер ${}^4\text{He}$.

Важную роль в формировании асимметрии между материей и антиматерией играют сфалеронные переходы, возникающие из-за нетривиальной топологии калибровочной группы $SU(2)$ электрослабого взаимодействия. В ранней Вселенной при высоких температурах переходы между топологически различными вакуумными состояниями могли приводить к нарушению сохранения барионного (B) и лептонного (L) чисел. Это позволяет объяснить барионную асимметрию и избыток частиц темной материи над соответствующими античастицами. В статьях[1] рассматриваются и подробно обсуждаются сфалеронные процессы, в процессе которых и образовывались темные атомы. Не будем приводить подробный вывод, но отсюда мы можем извлечь важный вывод для наименьшего значения массы m . Ядра темных атомов X-гелия, должны иметь массы более 1 ТэВ[2].

Согласно концепции X-гелия, заряженная стабильная частица X может проявлять либо лептоноподобные характеристики, либо действовать как уникальная совокупность новых семейств тяжелых кварков, характеризующаяся уменьшенным взаимодействием с адронами. Учитывая, что масса этих тяжелых $-2n$ заряженных частиц определяет массу темных атомов, следовательно, она объясняет наблюдаемую плотность всей темной материи.

Цель: В данной работе исследуются астрофизические источники темных атомов, такие как черные дыры и сверхновые. Также изучается процесс с потенциальным сильным взаимодействием атомов $X\text{He}$ с ядрами вещества в звездах, которое может нарушить связанное состояние темных атомов и привести к образованию аномальных изотопов, обилие которых в окружающей среде подчиняется строгим экспериментальным ограничениям[3].

1. СТРУКТУРА ТЕМНЫХ АТОМОВ

Конкретная конфигурация связанной системы темного атома определяется параметром

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

где:

Z_α - зарядовое число ядра nHe, Z_X - зарядовое число частицы X , α - постоянная тонкой структуры ($\approx 1/137$), A_α - массовое число nHe, m_p - масса протона, $R_{n\text{He}}$ - радиус соответствующего ядра nHe.

Если a попадает в интервал $0 < a < 1$, то полученное связанное состояние демонстрирует структуру, напоминающую атом Бора, с центрально расположенной отрицательно заряженной частицей X и точечным ядром гелия, вращающимся вокруг нее, подобно атомной модели Бора. Если a лежит в интервале $1 < a < \infty$, то связанное состояние имеет характеристики, сходные с моделью атомов Томсона, в которой неточечное ядро He испытывает колебания вокруг существенно массивной отрицательно заряженной частицы X .

Рассмотрим вариант боровской структуры темного атома более подробно. Конфигурация OHe состоит из двух компонентов: ядра гелия и частицы O^{--} , которые взаимно связаны и рассматриваются как точечные частицы. В этой системе установлена сферическая система координат, начало которой находится в точке расположения O^{--} . Таким образом, в сценарии, где $Z_\alpha = 2$ и $Z_X = -2$, модель рассматривает ядро He как точечное образование, случайно перемещающееся по поверхности сферы с радиусом, равным боровскому радиусу атома R_b . Следовательно, энергия связи для OHe, включающая точечный заряд ${}^4\text{He}$, составляет $I_0 \approx 1,6$ МэВ, а боровский радиус для He составляет примерно $R_b \approx 2 \times 10^{-13}$ см [7]. Ядро гелия имеет постоянную скорость, называемую боровской скоростью и обозначаемую V . Скорость -частицы, движущейся по боровской орбите, соответствует примерно $V_\alpha \approx 3 \times 10^4$ см/с.

Однако это лишь частный случай с $n = 1$. Частица X может нести заряд $-2n$, связанная с n ядрами гелия. Все темные атомы, начиная с $n = 2$, имеют томсоновскую структуру. Темные атомы X-гелия в модели Томсона состоят из двух связанных составляющих: ядра n-гелия и X-частицы. В этой конфигурации XHe выглядит следующим образом: заряженное ядро n-гелия, представляющее из себя заряженную сферу, заключает в себе точечную частицу X . nHe заметно легче, чем X , в результате чего ядра

<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

Рисунок 1 — Структура связанных состояний XN

колеблются вокруг X. В ссылке [63], описывается система из трех взаимодействующих заряженных частиц посредством кулоновских и ядерных сил, последовательно строится численная модель, которая может качественно реконструировать форму эффективного потенциала взаимодействия между XHe и ядром-мишенью в двух полуклассических подходах: подходе восстановления траекторий частиц, который включает в себя модель Бора и модель Томсона, и подходе восстановления потенциала.

2. ИСПАРЕНИЕ ЧЕРНЫХ ДЫР

Одним из источников образования темных атомов может являться испарение черных дыр(ЧД). Масса частицы накладывает ограничения на саму массу черной дыры, которая может участвовать в таком процессе. ЧД с массой 10^{15} г испускает частицы с энергией 10 МэВ. Для испускания частиц с массой более 1 Тэв, такие ЧД рные дыры должны обладать массой не более 10^5 г. Проведем для подобных черных дыр ряд оценок испускаемого потока. Для этого воспользуемся калькулятором излучения Хокинга Температура Хокинга[4]. Возьмем черную дыру средней массы — примерно 1000 масс солнца.

Quantity	Value	Units	Expression
Mass	1000	M☉	M
Schwarzschild radius	2.95399E6	m	$R = M \frac{2G}{c^2}$
Surface area	1.09655E14	m²	$A = M^2 \frac{16\pi G^2}{c^4}$
Effective density	1.30516E10	ρ☉	$\rho = \frac{1}{M^2} \frac{3c^6}{32\pi G^3}$
Surface gravity*	1.52125E10	m/s²	$\kappa = \frac{1}{M} \frac{c^4}{4G}$
Surface tides	10299.6	m/s²/m	$d\kappa_R = \frac{1}{M^2} \frac{c^6}{4G^2}$
Time to singularity	0.0154778	s	$t_S = M \frac{\pi G}{c^3}$
Entropy	1.04947E83	(dimensionless)	$S = M^2 \frac{4\pi G}{\hbar c}$
Temperature	6.16871E-11	K	$T = \frac{1}{M} \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B G}$
Peak photons	2.08415E-14	eV	$\lambda_{\log\text{peak}} = M \frac{16\pi^2 G}{c^2 [W(-4e^{-4}) + 4]}$
Nominal luminosity	9.00362E-35	W	$L = \frac{1}{M^2} \frac{\hbar c^6}{15360\pi G^2}$
Lifetime	3.65988E83	s	$t = M^3 \frac{5120\pi G^2}{1.8083\hbar c^4}$

Рисунок 2 — Расчет излучения Хокинга

Поток частиц (число частиц в секунду)

$$\frac{dN}{dt} = \frac{L}{k_B T} = \frac{c^3}{15360\pi G M} \approx 10^{15} \quad (1)$$

Полученный поток не дает заметного вклада в объеме анализируемых экспериментов. Поэтому нельзя сказать, что испарение черных дыр, является значимым источником образования темных атомов.

3. ОБРАЗОВАНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ ТЕМНЫХ АТОМОВ

Далее рассмотрим следующий источник темных атомов - сверхновые. Темные атомы захватываются звездами и содержатся в них, поскольку гравитационное поле звезды не дает им покинуть ее оболочку. Темные атомы там накапливаются и содержатся вплоть до момента образования сверхновой. В момент взрыва сверхновой, темные атомы X -nHe могут ионизоваться и образовывать свободную многозарядную компоненту X^{-2n} ? которая может захватываться другими ядрами тяжелых элементов, содержащихся в сверхновой, такими как железо, никель, сера и другие. Посмотрим на энергию ионизации X -nHe и рассчитаем возможную энергию для аномальных изотопов темных атомов. Энергия связи для O-He: Как можно увидеть X -nHe действительно

$$E_{n_{OHe}} = \frac{-8m_{He}\alpha^2}{n^2} \text{ MeV}$$

$$-8m_{He}\alpha^2 \approx -1.6 \text{ MeV}$$

но ионизуется в условиях взрыва сверхновой. Рассчитаем возможную энергию связи для аномальных изотопов темных атомов:

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

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 1 — Энергия связи аномальных изотопов $X^{-2n}N$ (МэВ)

Как можно увидеть, сверхновые действительно могут ионизировать атомы O-He, но аномальные изотопы уже не разрушаются в таких условиях. Таким образом можно утверждать, что аномальные изотопы образуют поток темных атомов в момент взрыва сверхновой.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная научно-исследовательская работа посвящена исследованию различных астрофизических механизмов образования потоков многозарядных составляющих темных атомов. Для начала была исследована квантово-механическая структура темных атомов и рассмотрены их различные типы: боровский и томсоновский тип.

Далее была получена оценка потока темных атомов, предположительно возникающего при испарении черных дыр. Полученный поток не дает заметного вклада в объеме анализируемых экспериментов. Поэтому нельзя сказать, что испарение ЧД, является значимым источником образования темных атомов.

После был рассмотрен следующий источник темных атомов - сверхновые. Была рассчитана энергия ионизации для аномальных изотопов темных атомов в условиях взрыва сверхновой. Показана возможность захвата многозарядной компоненты X тяжелыми ядрами и их последующее ускорение в сверхновой.

В дальнейшем планируется расчет потока темных атомов от сверхновых и построение модели их распределения в пространстве.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Beylin, V.A.; Bikbaev, T.E.; Khlopov, M.Y.; Mayorov, A.G.; Sopin, D.O.
Dark Atoms of Nuclear Interacting Dark Matter.,
Universe 10, 368. , (2024)
Beylin, V.; Khlopov, M.; Kuksa, V.; Volchanskiy, N. New Physics of Strong Interaction and Dark Universe. Universe 2020, 6, 196. [CrossRef]
2. Cudell, J.R.; Khlopov, M.Y.; Wallemacq, Q.,
The nuclear physics of OHe.,
Bled Work. Phys., **13**, (2012)
3. V.T. Toth. Hawking Radiation Calculator [Электронный ресурс].
URL: <https://www.vttoth.com/CMS/physics-notes/311-hawking-radiation-calculator> (дата обращения: 27 мая 2025 г.).
4. M. Khlopov,
What comes after the Standard Model?,
Progress in Particle and Nuclear Physics, **Volume 116**, (2021), ISSN 0146-641