



Исследование астрофизических механизмов образования потоков многозарядных составляющих темных атомов.

Басов Лев Б22-102

Научный руководитель: Хлопов М.Ю.

27.05.2025



Актуальность

Один из возможных кандидатов на роль темной материи - частица с электрическим зарядом X^{-2n} , которая может образовывать темные атомы, объясняющие скрытую массу Вселенной.

Система темных атомов состоит из $-2n$ (n - любое натуральное число) заряженных частиц X (для $n = 1$, что соответствует O^{--}) и ядра He , удерживаемых вместе силой Кулона. Данная модель может объяснить парадоксы поиска частиц скрытой массы в подземных экспериментах DAMA/NaI и DAMA/LIBRA.

Цель

Цель:

Рассмотреть механизмы испускания темных атомов, а также образования аномальных изотопов при захвате ядер тяжелых элементов в условиях взрыва сверхновой. проблемы, связанные с потенциально сильным взаимодействием атомов X -He с ядрами материи, которое может нарушить связанное состояние темных атомов и привести к образованию аномальных изотопов.

Задача:

1. Рассмотреть возможный поток темных атомов от ЧД
2. Выяснить возможность термализации темных атомов в процессе взрыва сверхновой.
3. Объяснить возможность образования аномальных изотопов.
4. Посчитать энергию связи темных атомов томсоновского типа.

Расчет потока ЧД

Масса частицы накладывает ограничения на саму массу черной дыры, которая может участвовать в таком процессе. Для испускания частиц с массой более 1 ТэВ, такие ЧД должны обладать массой не более 10^5 г. Проведем для подобных черных дыр ряд оценок испускаемого потока.

Для черную дыру средней массы - примерно 1000 масс солнца.

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

Quantity	Value	Units	Expression
Mass	1000	$M_\odot$	M
Schwarzschild radius	2.95399E6	m	$R = M \frac{2G}{c^2}$
Surface area	1.09655E14	m^2	$A = M^2 \frac{16\pi G^2}{c^4}$
Effective density	1.30516E10	$\rho_\odot$	$\rho = \frac{1}{M^2} \frac{3c^6}{32\pi G^3}$
Surface gravity*	1.52125E10	m/s^2	$\kappa = \frac{1}{M} \frac{c^4}{4G}$
Surface tides	10299.6	$m/s^2/m$	$d\kappa_R = \frac{1}{M^2} \frac{c^6}{4G^2}$
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	$t = M^3 \frac{5120\pi G^2}{1.8083\hbar c^4}$

Модели темного атома

В таблице приведена структура некоторых связанных состояний XN:

- В - все изотопы образуют боровские частицы;
- Т - все изотопы образуют частицы типа Томсона;

<i>n</i>	<i>A</i>					
	<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

Расчет энергии связи

Энергия связи для О-He

$$\Delta_r \Psi(\vec{r}) + \frac{2m_{\text{He}}}{\hbar^2} \left(E_{\text{OHe}} + \frac{4e^2}{r} \right) \Psi(\vec{r}) = 0$$

$$E_{n_{\text{OHe}}} = \frac{-8m_{\text{He}}\alpha^2}{n^2} \text{ MeV} \quad -8m_{\text{He}}\alpha^2 \approx -1.6 \text{ MeV}$$

Для простой оценки энергии связи томсоноподобных связанных состояний использовать следующий гамильтониан

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

Формула энергии связи

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

Энергия связи для атомов тяжелых элементов

Результаты расчета показывают, что аномальные изотопы обладают большой энергией связи и не ионизируются в условиях взрыва сверхновой, а ускоряются и образуют поток экзотических 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 1 — Энергия связи аномальных изотопов $X^{-2n}N$ (МэВ)

- Был рассмотрен возможный поток темных атомов от ЧД
- Было проведено ознакомление с теоретической моделью структуры темного атома, боровского и томсоновского типа;
- Проведены расчеты для энергии ионизации для аномальных изотопов темных атомов в случае их захвата ядрами тяжелых элементов. Объяснена возможность их ионизации в условиях взрыва сверхновой.

В дальнейшем планируется расчет потока темных атомов от сверхновых и нахождения их распределения.



Спасибо за внимание

Список литературы

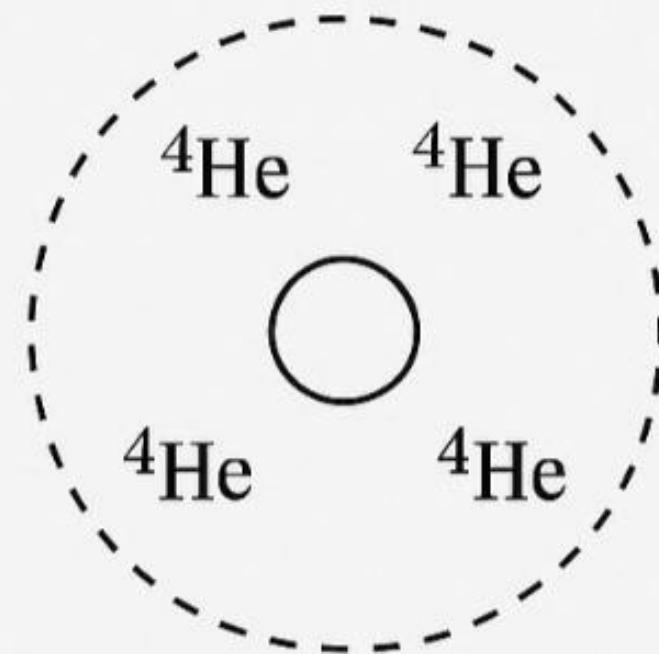
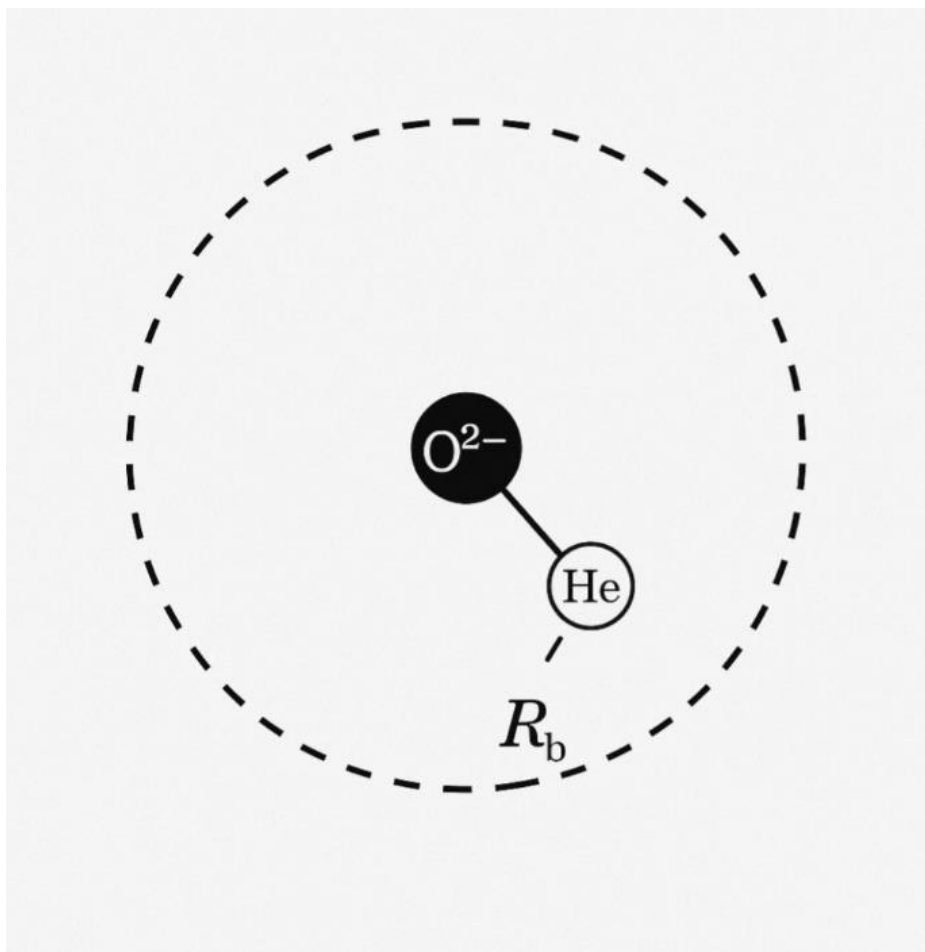
1. Beylin, V.A.; Bikbaev, T.E.; Khlopov, M.Y.; Mayorov, A.G.; Sopin, D.O. Dark Atoms of Nuclear Interacting Dark Matter. *Universe* 2024, 10, 368.
<https://doi.org/10.3390/universe10090368>
2. Cahn, R.N.; Glashow, S.L. Chemical Signatures for Superheavy Elementary Particles. *Science* **1981**, 213, 607–611. [CrossRef]
3. M. Khlopov, What comes after the Standard Model?, *Progress in Particle and Nuclear Physics*, Volume 116, 2021, 103824, ISSN 0146-641
4. А. В. Кузнецов, Н. В. Михеев, А. А. Окрugin, “Магнитный момент дираковского нейтрино и динамика взрыва сверхновой”, *Письма в ЖЭТФ*, **89**:3 (2009), 115–120; *JETP Letters*, **89**:3 (2009), 97–101

Температура, необходимая для распада темного атома

Table 3. The recombination temperatures for dark atoms.

n	T_{rec} keV			
	p	D	${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$
1	3	5	28	107/6
2	13	19	$\sim 192/42$	222/85
3	29	44	$\sim 292/116$	339/180
4	54	79	$\sim 395/198$	459/285
5	86	290/17	$\sim 500/286$	580/395

Вид структуры темного атома



**Thomson
Model**

Химический состав сверхновой

Big Bang fusion Cosmic ray fission Dying low-mass stars Merging neutron stars Exploding massive stars Exploding white dwarfs Human synthesis No stable isotopes																He 2					
H 1	Li 3	Be 4														B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12														Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18	
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36				
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54				
Cs 55	Ba 56	La 57	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86				
Fr 87	Ra 88		Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71					
		Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103					

Периодическая таблица, показывающая источник каждого элемента в межзвездной среде

