

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 539.12.01

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ
КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ НОВЫХ ФОРМ
СТАБИЛЬНЫХ АДРОНОВ. ЗАРЯДОВО-СИММЕТРИЧНЫЙ
СЛУЧАЙ**

Студент

_____ Н. Г. Монаков

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

_____ М. Ю. Хлопов

Москва 2023

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ НОВЫХ ФОРМ
СТАБИЛЬНЫХ АДРОНОВ. ЗАРЯДОВО-СИММЕТРИЧНЫЙ
СЛУЧАЙ**

Студент

_____ Н. Г. Монаков

Научный руководитель,

д.ф.-м.н., проф.

_____ М. Ю. Хлопов

Рецензент,

к.ф.-м.н.

_____ А. Г. Майоров

Секретарь ГЭК,

к.ф.-м.н.

_____ А. А. Кириллов

Зав. каф. №40,

д.ф.-м.н., проф.

_____ М. Д. Скорохватов

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Зарядово-симметричная модель тяжелых кварков	4
2 Этап закалки тяжелых кварков	5
3 Образование связанных систем и кластеризация кварков	8
Заключение	13
Список использованных источников	14

ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным космологическим представлениям, частицы скрытой массы составляют около 25 % космологической плотности. Кандидатами на роль таких частиц могут быть образования из новых тяжёлых кварков, которые кроме прочего, связываясь с электронами могут образовывать аномальные изотопы химических элементов. Необходимо проверить согласованность данных моделей с экспериментальными значениями концентраций этих изотопов. На данном этапе рассматривается зарядово-симметричная модель таких тяжёлых стабильных фермионов.

1 ЗАРЯДОВО-СИММЕТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ ТЯЖЕЛЫХ КВАРКОВ

В работе рассматривается модель Бейлина-Кукса [1], [2], предполагающая существование новых стабильных кварков U -типа в условиях зарядовой симметрии. Задача состоит в том, чтобы проследить космологическую эволюцию газа таких кварков и выяснить какие формы составных систем, как адронных, так и кластеров можно ожидать в результате этой эволюции. Заряд таких кварков полагается $q_U = +\frac{2}{3}$, а масса $m_U > 1$ ТэВ, исходя из экспериментов по поиску новых стабильных кварков на БАК дающих ограничение снизу.

2 ЭТАП ЗАКАЛКИ ТЯЖЕЛЫХ КВАРКОВ

Рассмотрим кварки U и антикварки \bar{U} при разных температурах.

- При температурах $T > m_U$ U и \bar{U} находятся в равновесии с плазмой

$$U + \bar{U} \rightleftharpoons gg$$

на этом этапе концентрация фермионов n

$$n_{pleq} = \int \frac{1}{(2\pi)^3} \cdot \frac{g_s d^3p}{e^{\frac{E}{T}-\mu} + 1} = g_s \left(\frac{mT}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m}{T}} \quad (2.1)$$

последнее равенство написано для нерелятивистского случая с учетом $\mu = 0$ в соответствии с зарядовой симметрией задачи.

- При температурах $m_U > T > T^*$, где

$$T^* = k \cdot m_U \text{ — температура закалки, } k = \frac{1}{30} \sim \frac{1}{20}$$

обратная реакция становится менее вероятной, поэтому равновесие смещается в сторону образования глюонов, соответственно

$$U + \bar{U} \rightarrow gg$$

скорость аннигиляции есть

$$\Gamma = n \langle \sigma v \rangle$$

а изменение концентрации

$$\dot{n} = -n^2 \langle \sigma v \rangle - 3Hn$$

или, переходя к относительной концентрации n_o с учетом

$$-H dt = \frac{dT}{T},$$

получим

$$dn_o = n_o^2 \cdot s \langle \sigma v \rangle \frac{1}{HT} dT, \quad (2.2)$$

где $n_o = n/s$ — относительная концентрация,

$$\text{плотность энтропии } s = \frac{\varepsilon + p + \mu n}{T} \stackrel{RD}{=} \frac{\varepsilon + \frac{1}{3}\varepsilon}{T} = \frac{4}{3} \frac{\varepsilon}{T} = g'_{\text{eff}} \frac{4\pi^2}{45} T^3$$

$$H = \sqrt{\frac{g''_{\text{eff}} \cdot 4\pi^3}{45}} G \cdot T^2 = \sqrt{\frac{g''_{\text{eff}} \cdot 4\pi^3}{45}} \cdot \frac{T^2}{m_{Pl}}$$

$$\langle \sigma v \rangle = \left(\frac{\alpha_c}{m_U} \right)^2$$

$\alpha_c = 0.12$ константа взаимодействия в КХД [3]. Учтя ещё [4],[5]

$$g'_{\text{eff}} = \sum_{\text{bosons}} g_s^b \cdot \left(\frac{T_b}{T} \right)^3 + \frac{7}{8} \sum_{\text{fermions}} g_s^f \cdot \left(\frac{T_f}{T} \right)^3$$

$$g''_{\text{eff}} = \sum_{\text{bosons}} g_s^b \cdot \left(\frac{T_b}{T} \right)^4 + \frac{7}{8} \sum_{\text{fermions}} g_s^f \cdot \left(\frac{T_f}{T} \right)^4$$

$$g'_{\text{eff}} = g''_{\text{eff}} = g_{\text{eff}}^f \approx 90$$

перепишем (2.2) в виде

$$\frac{dn_o}{n_o^2} = \left(\frac{\alpha_c}{m_U} \right)^2 \cdot g_{\text{eff}}^f \frac{4\pi^2}{45} \cdot \sqrt{\frac{45}{g_{\text{eff}}^f \cdot 4\pi^3 G}} \cdot dT$$

решением которого является

$$\frac{1}{n'_o} \Big|_{n_o}^{n_{pleq}} = \left(\frac{\alpha_c}{m_U} \right)^2 \cdot g_{\text{eff}}^f \frac{4\pi^2}{45} \cdot \sqrt{\frac{45}{g_{\text{eff}}^f \cdot 4\pi^3 G}} \cdot T' \Big|_{m_U}^T \quad (2.3)$$

$$n_o = \left(\frac{m_U}{\alpha_c} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{45}{4\pi \cdot g_{\text{eff}}^f}} \cdot \frac{1}{m_{Pl}} \cdot \frac{1}{m_U - T} \quad (2.4)$$

В результате относительная концентрация при T^*

$$n_o^* = \left(\frac{m_U}{\alpha_c} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{45}{4\pi \cdot g_{\text{eff}}^f}} \cdot \frac{1}{m_{Pl}} \cdot \frac{1}{m_U - T^*} \approx \frac{m_U}{1\text{ТэВ}} \cdot 6 \cdot 10^{-15} \quad (2.5)$$

3 ОБРАЗОВАНИЕ СВЯЗНЫХ СИСТЕМ И КЛАСТЕРИЗАЦИЯ КВАРКОВ

- При температурах $T \lesssim \alpha_c^2 \cdot m_U$ начинается объединение кварков и антикварков в (UU) U -дикварки и (UUU) U -кластеры и аналогично для \bar{U}

$$U + U \rightleftharpoons UU + g \quad U + UU \rightleftharpoons UUU + g$$

$$\bar{U} + \bar{U} \rightleftharpoons \bar{U}\bar{U} + g \quad \bar{U} + \bar{U}\bar{U} \rightleftharpoons \bar{U}\bar{U}\bar{U} + g$$

касательно \bar{U} -кластеров (аниутий) упомянем, что они могут объединяться с первичным гелием и создавать так называемый О-гелий, один из кандидатов на роль частиц скрытой массы.

$${}^4\text{He} + \text{O}^{--} \rightarrow \gamma + ({}^4\text{HeO}^{--})$$

так же происходит образование мезонов с последующей аннигиляцией

$$U + \bar{U} \rightleftharpoons U\bar{U} + g \tag{3.1}$$

$$U\bar{U} \rightarrow ggg \tag{3.2}$$

в (3.2) скорость аннигиляции оценим аналогично аннигиляции J/Ψ мезона [6],[7]

$$\Gamma = \frac{160}{81}(\pi^2 - 9) \cdot \frac{\alpha_c^3}{M^2} |\Psi(0)|^2 \left(1 + 4.9 \frac{\alpha_c}{\pi}\right), \tag{3.3}$$

где $|\Psi(0)|^2$ оценена [4],[8]

$$|\Psi(0)|^2 = \frac{64\pi}{a^3} = \frac{64\pi}{d_0^3} \left(\frac{m_U}{T}\right)^{0.9} = \frac{64\pi}{\alpha_c^3} \cdot T^3 \cdot \left(\frac{m_U}{T}\right)^{0.9}, \tag{3.4}$$

$$\Gamma = \frac{160}{81}(\pi^2 - 9) \cdot \frac{\alpha_c^3}{M^2} \cdot \frac{64\pi}{\alpha_c^3} \cdot T^3 \cdot \left(\frac{m_U}{T}\right)^{0.9} \left(1 + 4.9 \frac{\alpha_c}{\pi}\right), \quad (3.5)$$

$$\tau = \frac{\hbar}{\Gamma} \approx \left(\frac{m_U}{1\text{ТэВ}}\right)^{1.1} \cdot 5 \cdot 10^{-26} \text{с}, \quad (3.6)$$

а в (3.1) — скорость протекания обратной реакции [5]

$$t' = \frac{\hbar}{n\langle\sigma v\rangle} \approx \frac{\hbar}{g_{\text{eff}}^f \cdot T^3 \cdot \frac{\alpha_c^2}{m_U^2}} \approx \left(\frac{m_U}{1\text{ТэВ}}\right)^2 \cdot 1.7 \cdot 10^{-22} \text{с}. \quad (3.7)$$

$$\frac{t'}{\tau} = \frac{1.7 \cdot 10^{-22}}{5 \cdot 10^{-26}} \left(\frac{m_U}{1\text{ТэВ}}\right)^{0.9} \sim 10^3 - 10^4. \quad (3.8)$$

Из (3.8) видно, что $t' \gg \tau$, значит, (3.1) следует записать в виде

$$U + \bar{U} \rightarrow U\bar{U} + g \quad (3.9)$$

то есть мы показали, что на данном этапе реакция аннигиляции через связывание является эффективной.

Далее рассмотрим всю совокупность реакций с участием дикварков и кластеров. Скорость образования связанных систем в нулевом приближении посчитаем одинаковой и равной [5]:

$$\langle\sigma v\rangle = \pi \left(\frac{m_U}{T}\right)^{0.9} \cdot \left(\frac{\alpha}{m_U}\right)^2 \quad (3.10)$$

Уменьшение концентрации UU связанное с разрушением дикварка глюоном рассмотрим как процесс, аналогичный фотоионизации атома водорода, в таком случае сечение примет вид, аналогичный формуле Крамера [9].

$$\langle\sigma v\rangle_{\text{PI}} = g \frac{64\pi^4 e^{10} m_e}{3\sqrt{3} c^4 h^6} \cdot \frac{N^4 \lambda^3}{(n+1)n^4}, \quad (3.11)$$

$$\langle\sigma v\rangle_{\text{PI}} = \frac{64\pi^4 \alpha^5 m_U}{3\sqrt{3}} \int_I^\infty \frac{1}{E^3} \frac{dE}{e^{\frac{E}{T}} - 1} \quad (3.12)$$

Далее рассчитаем относительные концентрации, используя (2.2):

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dn_U}{dT} &= -\pi \frac{s}{HT} \left(\frac{m_U}{T} \right)^{0.9} \left(\frac{\alpha_c}{m_U} \right)^2 \left(-n_U^2 - n_U n_{\bar{U}} - \frac{n_U n_{UU}}{(4/3)^{1.1}} - \frac{n_U n_{\bar{U}\bar{U}}}{(4/3)^{1.1}} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{n_{UU} n_{\bar{U}}}{(4/3)^{1.1}} - \frac{n_U n_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}}}{(3/2)^{1.1}} + \frac{n_{UUU} n_{\bar{U}\bar{U}}}{(12/5)^{1.1}} + \frac{64\pi^4 \alpha_c^5 m_U}{3\sqrt{3}} n_{UU} n_g \int_I^\infty \frac{1}{E^3} \frac{dE}{e^{\frac{E}{T}} - 1} \right) \\ \frac{dn_{UU}}{dT} &= -\pi \frac{s}{HT} \left(\frac{m_U}{T} \right)^{0.9} \left(\frac{\alpha_c}{m_U} \right)^2 \left(n_U^2 - \frac{n_U n_{UU}}{(4/3)^{1.1}} - \frac{n_{UU} n_{\bar{U}}}{(4/3)^{1.1}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{n_{UU} n_{\bar{U}\bar{U}}}{(2)^{1.1}} + \frac{n_{UUU} n_{\bar{U}}}{(3/2)^{1.1}} - \frac{n_{UU} n_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}}}{(12/5)^{1.1}} - \frac{64\pi^4 \alpha_c^5 m_U}{3\sqrt{3}} n_{UU} n_g \int_I^\infty \frac{1}{E^3} \frac{dE}{e^{\frac{E}{T}} - 1} \right) \\ \frac{dn_{UUU}}{dT} &= -\pi \frac{s}{HT} \left(\frac{m_U}{T} \right)^{0.9} \left(\frac{\alpha_c}{m_U} \right)^2 \left(\frac{n_U n_{UU}}{(4/3)^{1.1}} - \frac{n_{UUU} n_{\bar{U}}}{(3/2)^{1.1}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{n_{UUU} n_{\bar{U}\bar{U}}}{(12/5)^{1.1}} - \frac{n_{UUU} n_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}}}{(3)^{1.1}} \right) \end{aligned} \right. \quad (3.13)$$

Касательно системы (3.13) отметим, что в нее так же входят уравнения для $n_{\bar{U}}, n_{\bar{U}\bar{U}}, n_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}}$, однако ввиду зарядовой симметрии модели концентрации их будут равны соответственно n_U, n_{UU}, n_{UUU} , а уравнения иметь аналогичный вид с точностью до взаимной замены $U \leftrightarrow \bar{U}$.

Данная система была решена с использованием пакета MATLAB численными методами. На графиках ниже приведены зависимости концентраций от температуры для разных масс m_U .

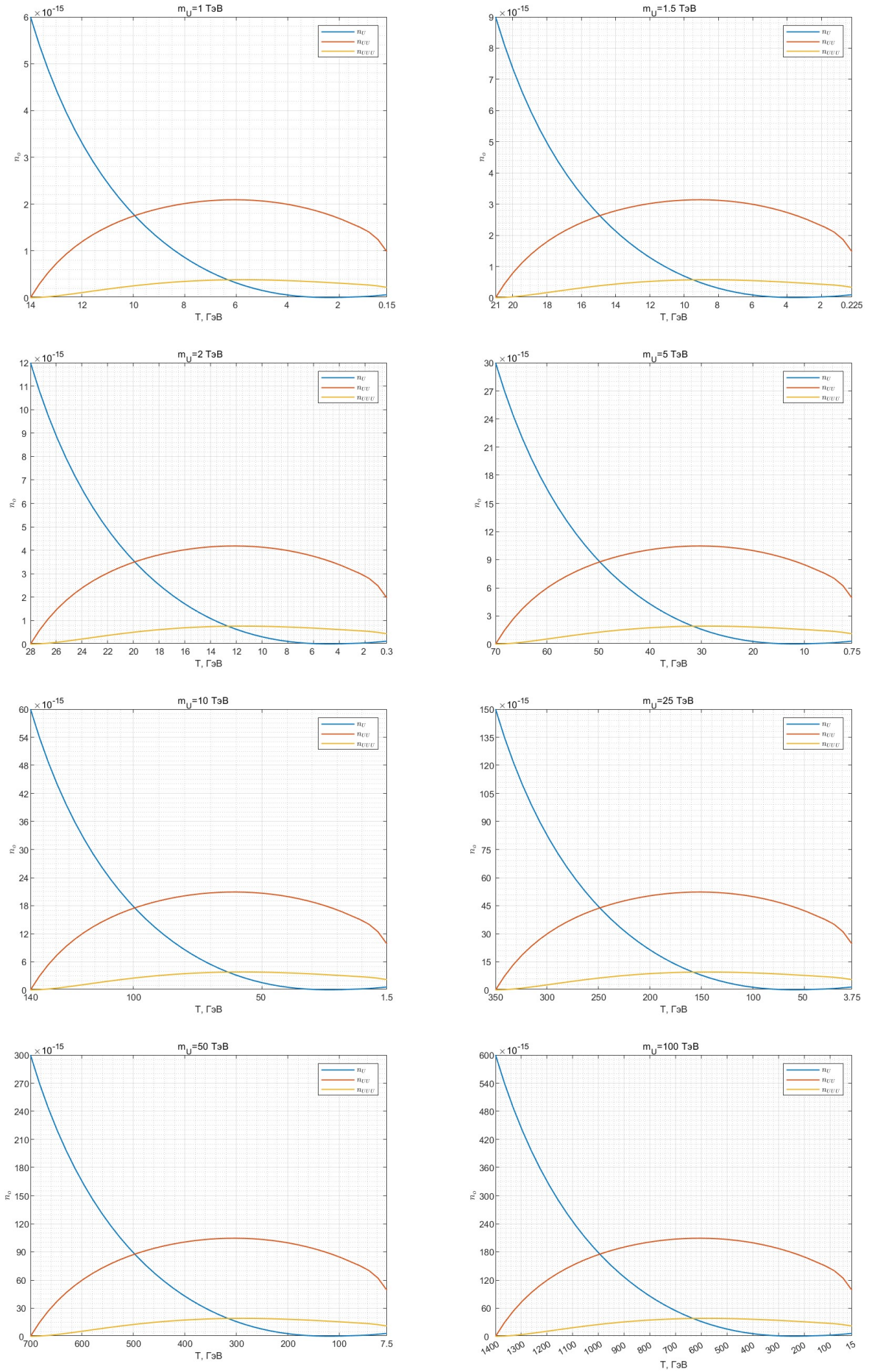


Рисунок 3.1 — График зависимости концентраций n_U, n_{UU}, n_{UUU} от температуры для разных масс m_U .

Процессы образования дикварков и кластеров, а также обратные им (3.14) будем считать равновесными, ввиду (3.17)

$$U + U \rightleftharpoons UU + g, \quad U + UU \rightleftharpoons UUU + g, \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \Gamma(T = \alpha^2 m_U) = n \langle \sigma v \rangle &= g_{\text{eff}} \cdot T^3 \cdot \pi \left(\frac{m_U}{T} \right)^{0.9} \cdot \left(\frac{\alpha}{m_U} \right)^2 \approx \\ &\approx 5.5 \cdot 10^8 \text{ eV}, \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$H(T = \alpha^2 m_U) = \sqrt{\frac{g_{\text{eff}} \cdot 4\pi^3}{45}} \cdot \frac{T^2}{m_{Pl}} \approx 10^{-6} \text{ eV}, \quad (3.16)$$

$$\Gamma(T = \alpha^2 m_U) > H(T = \alpha^2 m_U) \quad (3.17)$$

В равновесии содержание этих связанных систем определяется уравнениями Саха:

$$\begin{cases} \frac{n_U \cdot n_U}{n_g \cdot n_{UU}} = \exp \left\{ -\frac{I_{UU}}{T} \right\} \\ \frac{n_U \cdot n_{UU}}{n_g \cdot n_{UUU}} = \exp \left\{ -\frac{I_{UUU}}{T} \right\} \end{cases} \quad (3.18)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проделанной работы была рассмотрена возможность существования стабильных кварков нового поколения в условиях зарядовой симметрии, прослеживалась космологическая эволюция этих кварков и составных систем которые они образуют друг с другом. Дальнейшая эволюция таких систем может приводить как к образованию кандидатов на роль частиц скрытой массы, так и сопутствующих заряженных стабильных систем, которые могут создавать проблему связанную с перепроизводством аномальных изотопов водорода и других элементов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Kuksa V., Beylin V.* Heavy Quark Symmetry and Fine Structure of the Spectrum of Hadronic Dark Matter // Symmetry. — 2020. — Vol. 12, no. 11. — P. 1906.
2. Hadronic and Hadron-Like Physics of Dark Matter / V. Beylin [et al.] // Symmetry. — 2019. — Vol. 11, no. 4. — P. 587. — arXiv: [1904.12013 \[hep-ph\]](#).
3. *Hinchliffe I., Manohar A. V.* The QCD coupling constant // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. — 2000. — Vol. 50. — P. 643–678. — arXiv: [hep-ph/0004186](#).
4. May heavy hadrons of the 4th generation be hidden in our universe while close to detection? / K. Belotsky [et al.]. — 2004. — arXiv: [hep-ph/0411271](#).
5. *Fargion D., Khlopov M.* Tera-Leptons Shadows over Sinister Universe // arXiv e-prints. — 2005. — hep-ph/0507087. — arXiv: [hep-ph/0507087 \[hep-ph\]](#).
6. *Parashar D.* ON CHARMONIUM DECAYS // Can. J. Phys. — 1981. — T. 59. — C. 1944–1947.
7. *Mangoni A.* Hadronic decays of the J/psi meson : дис. . . . канд. / Mangoni Alessio. — Universita' Di Perugia, 2020. — arXiv: [2002.09675 \[hep-ph\]](#).
8. *Zeldovich Y. B., Khlopov M. Y.* On the Concentration of Relic Magnetic Monopoles in the Universe // Phys. Lett. B. — 1978. — Vol. 79. — P. 239–241.

9. *Kramers H. A.* XCIII. On the theory of X-ray absorption and of the continuous X-ray spectrum // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. — 1923. — Vol. 46, issue 275. — P. 836–871. — eprint: <https://doi.org/10.1080/14786442308565244>.