

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

УДК 539.12.01

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ НОВЫХ ФОРМ
СТАБИЛЬНЫХ АДРОНОВ.
ЗАРЯДОВО-СИММЕТРИЧНЫЙ СЛУЧАЙ

Научный руководитель

Д.ф-м.н., проф.

Студент

_____ М. Ю. Хлопов

_____ Н. Г. Монаков

Москва 2023

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. На данном этапе рассматривается зарядово-симметричная модель таких тяжёлых фермионов.

1 Глава 1

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 $m_U > 1$ TeV, исходя из экспериментов по поиску новых стабильных кварков на БАК дающих ограничение снизу.

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

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



на этом этапе концентрация фермионов n

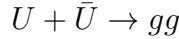
$$n = \int \frac{1}{(2\pi)^3} \cdot \frac{g_s \cdot d^3p}{e^{-\frac{E}{T} - \mu} + 1} = g_s \left(\frac{mT}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m}{T}} \quad (1)$$

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

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

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

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



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

$$-Hdt = \frac{dT}{T}$$

$$dn_o = n_o^2 \cdot s \langle \sigma v \rangle HT dT, \quad \text{где } n_o = \frac{n}{s} - \text{относительная концентрация} \quad (2)$$

$$\text{плотность энтропии } s = \frac{\varepsilon + p + \mu n}{T} \stackrel{RD}{=} \frac{\varepsilon + \frac{1}{3}\varepsilon}{T} = \frac{4}{3} \frac{\varepsilon}{T} = g_{eff} \frac{4\pi^2}{45} T^3$$

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

$$g_{eff} = \sum_{bosons} g_s^b \cdot \left(\frac{T_b}{T} \right)^4 + \frac{7}{8} \sum_{fermions} g_s^f \cdot \left(\frac{T_f}{T} \right)^4 \approx 90$$

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

$$H = \sqrt{\frac{g_{eff} \cdot 4\pi^3}{45}} G \cdot T^2 = \sqrt{\frac{g_{eff} \cdot 4\pi^3}{45}} \cdot \frac{T^2}{m_{Pl}}$$

перепишем 2 в виде

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

решением которого является

$$n_o = \frac{H}{\left(\frac{\alpha_c}{m_U}\right)^2 \cdot g_{eff} \frac{4\pi^2}{45} T^3} \quad (3)$$

В результате относительная концентрация при T^*

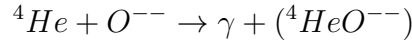
$$n_o = \frac{H}{\left(\frac{\alpha_c}{m_U}\right)^2 \cdot g_{eff} \frac{4\pi^2}{45} T^3}$$

- 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.



так-же происходит образование мезонов с последующей аннигиляцией

$$U + \bar{U} \rightleftharpoons U\bar{U} + g \quad (4)$$

$$U\bar{U} \rightarrow gg \quad (5)$$

в 5 скорость аннигиляции оценим аналогично аннигиляции J/Ψ мезона [4]

$$\tau = \frac{\alpha_c}{64\pi} \cdot \left(\frac{m_U}{T}\right)^{\frac{21}{10}} \cdot \frac{1}{m_U} = \frac{0.12}{64\pi} \left(\frac{1}{0.12}\right)^{\frac{21}{10}} \cdot \frac{1}{1 \text{ TeV}} \hbar \approx 10^{-27} c$$

а в 4 - скорость протекания обратной реакции [5]

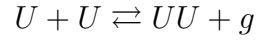
$$t' = \frac{\hbar}{n \langle \sigma v \rangle} \approx \frac{\hbar}{g_{eff} \cdot T^3 \cdot \frac{\alpha_c^2}{m_U^2}} \approx 10^{-24} c$$

видно, что $t' \gg \tau$, значит 4 следует записать в виде

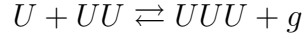
$$U + \bar{U} \rightarrow U\bar{U} + g \quad (6)$$

т.е. мы показали, что на данном этапе реакция аннигиляции через связывания является эффективной.

Далее необходимо оценить процесс образования дикварков.



В работе [6] прямой и обратный процессы рассматриваются как равновесные вплоть до $T \ll I_i \approx \frac{\alpha_c^2 \cdot M_u}{10}$, ввиду большой относительной концентрации глюонов $n_g \gg n_U$. А после формирования дикварков становится возможным процесс образования кластеров.



В равновесии содержание этих связанных систем определяется уравнениями Саха:

$$\frac{n_U \cdot n_U}{n_g \cdot n_{UU}} = \exp\left(-\frac{I_{UU}}{T}\right) \quad (7)$$

$$\frac{n_U \cdot n_{UU}}{n_g \cdot n_{UUU}} = \exp\left(-\frac{I_{UUU}}{T}\right) \quad (8)$$

2 Заключение

На данном этапе работы были освоены методы расчета эволюции тяжелых кварков на ранних стадиях эволюции Вселенной. Рассчитана зависимость закалённой концентрации кварков от их масс. Были освоены методы расчёта скоростей процессов аннигиляции, рекомбинации и разрушения связанных систем в космической плазме. На основе этих методов будет проведен анализ кинетики связывания тяжелых кварков в различные формы связанных систем с целью выявить возможность их согласования с экспериментальными ограничениями на концентрацию аномальных изотопов, что в конечном итоге позволит проверить реалистичность данной зарядово-симметричной модели.

Список литературы

- [1] Vladimir Kuksa and Vitaly Beylin. Heavy Quark Symmetry and Fine Structure of the Spectrum of Hadronic Dark Matter. *Symmetry*, 12(11):1906, 2020.
- [2] Vitaly Beylin, Maxim Yu. Khlopov, Vladimir Kuksa, and Nikolay Volchanskiy. Hadronic and Hadron-Like Physics of Dark Matter. *Symmetry*, 11(4):587, 2019.
- [3] Ian Hinchliffe and Aneesh V. Manohar. The QCD coupling constant. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, 50:643–678, 2000.
- [4] K. Belotsky, Daniele Fargion, M. Yu. Khlopov, R. V. Konoplich, M. G. Ryskin, and K. I. Shibaev. May heavy hadrons of the 4th generation be hidden in our universe while close to detection? 11 2004.
- [5] K. M. Belotsky, E. A. Esipova, and A. A. Kirillov. On the classical description of the recombination of dark matter particles with a Coulomb-like interaction. *Phys. Lett. B*, 761:81–86, 2016.
- [6] D. Fargion and M. Khlopov. Tera-Leptons Shadows over Sinister Universe. *arXiv e-prints*, pages hep-ph/0507087, July 2005.