

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

доц. д.ф-м.н., проф.

Студент

_____ М. Ю. Хлопов

_____ Н. Г. Монаков

Москва 2021

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

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

на этом этапе концентрация фермионов n

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

последнее равенство написано для нерелятивистского случая с учетом $\mu = 0$, так как количество частиц является свободным параметром.

- 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

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

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

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

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

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

$\alpha_c = 0.12$ 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

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

- 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.

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

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]

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

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

2 Заключение

На данном этапе работы были освоены методы расчета концентраций тяжелых кварков на ранних стадиях эволюции Вселенной, рассчитаны зависимости концентраций кварков от их массы. Также были освоены методы расчёта времени аннигиляции и времени процесса аналогичного фоторасщеплению. В дальнейшем будет проведен анализ кинетики связывания тяжелых кварков в различные формы связанных состояний с целью выявить возможность их согласования с экспериментальными ограничениями, что в конечном итоге позволит сказать, не является ли данная зарядово-симметричная модель противоречащей реальной картине.

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.