



Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Институт ядерной физики и технологий
Кафедра физики элементарных частиц №40

Выпускная квалификационная работа студента на тему:

КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ НОВЫХ ФОРМ СТАБИЛЬНЫХ АДРОНОВ. ЗАРЯДОВО-СИММЕТРИЧНЫЙ СЛУЧАЙ

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:
ВЫПОЛНИЛ:

Д. Ф. –М. Н., ПРОФЕССОР М. Ю. ХЛОПОВ
СТУДЕНТ ГРУППЫ Б19 -102 Н. Г. МОНАКОВ

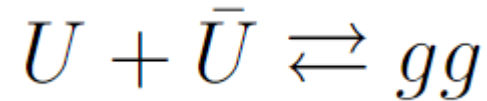
Москва 2023

Цель работы

В работе рассматривается модель Бейлина-Кукса , 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.

При температурах $T > m_U$ ($t[c] < 10^{-13}$) кварки и антикварки находятся в равновесии с плазмой

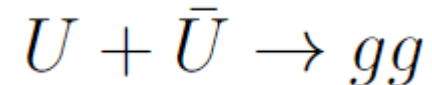


Концентрация фермионов на данном этапе:

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

последнее равенство написано для нерелятивистского случая с учетом того, что химический потенциал $\mu = 0$ в соответствии с зарядовой симметрией задачи.

При температурах $m_U > T > T^* = k \cdot m_U$, где $k = \frac{1}{30} \sim \frac{1}{20}$ ($10^{-13} < t[c] < 10^{-11}$) обратная реакция становится менее вероятной, поэтому равновесие смещается в сторону образования глюонов, соответственно



Концентрация фермионов на данном этапе получена из уравнения:

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

С учётом

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

И переходом к относительной концентрации

$$n_o = n/s$$

Получаем уравнение вида: $dn_o = n_o^2 \cdot s \langle \sigma v \rangle \frac{1}{HT} dT$

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

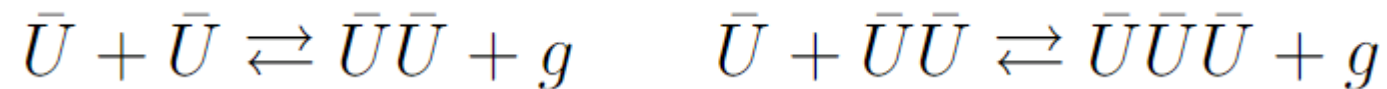
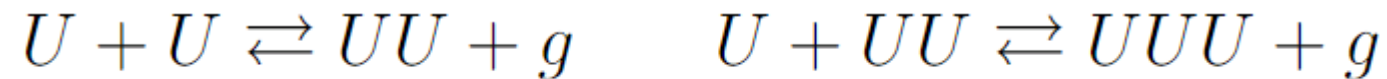
параметр Хаббла $H = \sqrt{\frac{g_{\text{eff}}'' \cdot 4\pi^3}{45}} G \cdot T^2 = \sqrt{\frac{g_{\text{eff}}'' \cdot 4\pi^3}{45}} \cdot \frac{T^2}{m_{Pl}}$

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

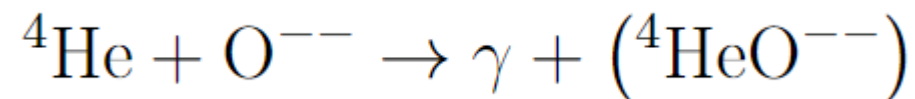
В результате относительная концентрация при $T = T^*$

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

При температурах $\alpha_c^2 \cdot m_U \geq T$ ($t[c] \geq 5 \cdot 10^{-10}$) начинается объединение кварков в U -дикварки и U -кластеры. Аналогичная картина наблюдается для антикварков.



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.



Образование мезона: $U + \bar{U} \rightleftharpoons U\bar{U} + g \quad U\bar{U} \rightarrow ggg$

Скорость аннигиляции оценим аналогично аннигиляции J/Ψ мезона

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

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

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

Скорость обратной реакции

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

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

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

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

Уменьшение концентрации дикварков связанное с разрушением дикварка глюоном рассмотрим как процесс, аналогичный фотоионизации атома водорода, в таком случае сечение примет вид, аналогичный формуле Крамерса.

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

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

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

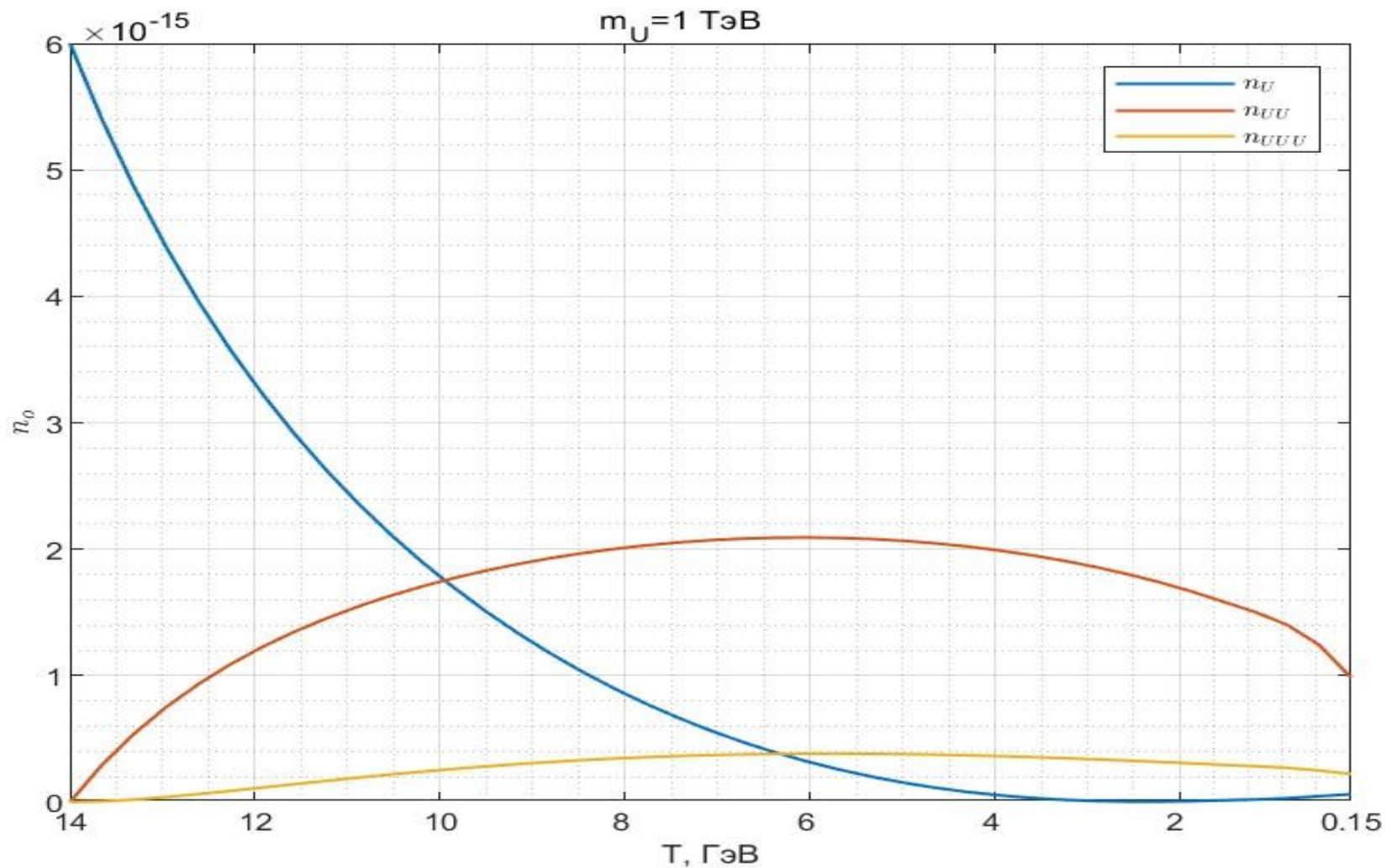


График зависимости концентраций n_U, n_{UU}, n_{UUU} от температуры

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 вплоть до фазового КХД перехода. 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.



Благодарю за внимание

