



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

Выпускная квалификационная работа на тему:

КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СОСТОЯНИЙ, ОБРАЗУЕМЫХ ТЯЖЕЛЫМИ СТАБИЛЬНЫМИ КВАРКАМИ

Научный руководитель
д. ф. –м. н., профессор:
Студент:

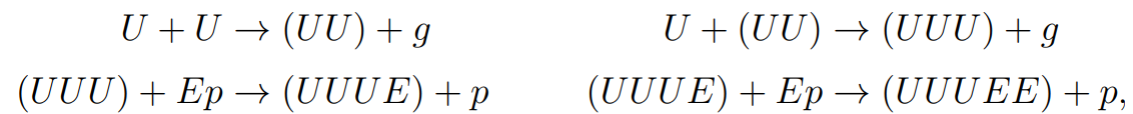
М. Ю. Хлопов
К. Ю. Массалов

Москва 2023

	I	II	III	IV
КВАРКИ	Верхний u	Очарованный c	Истинный t	???
	Нижний d	Странный s	Прелестный b	???
ЛЕПТОНЫ	Электрон e	Мюон μ	Тау-лептон τ	???
	Электронное нейтрино ν_e	Мюонное нейтрино ν_μ	Тау-нейтрино ν_τ	???

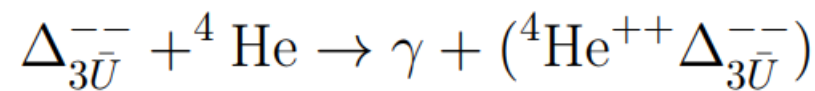
В данной работе рассматривается зарядово-асимметричная модель существования новых тяжелых кварков и исследуется изменение концентраций тяжелых кварков в ходе эволюции Вселенной вплоть до фазового КХД перехода. Последующий анализ их эволюции должен выявить подавление таких стабильных состояний, которые могут формировать изотопы известных элементов.

Избыток положительного заряда



Темный
атом

Избыток отрицательного заряда



Темный
атом

$$n_u < n_{\bar{u}}$$

$$m_U = 3,5 * S_6 \text{ ТэВ}$$

$$S_6 > 0,3$$

$$\alpha_{QCD} \equiv \alpha = 0,1$$

$$r = \frac{n}{s}$$

$$\kappa = \frac{n_{\bar{U}} - n_U}{s} \approx \frac{3.6 \cdot 10^{-14}}{S_6} \quad \text{- степень асимметрии}$$

$$s = \frac{2\pi^2 g_s}{45} T^3 \quad \text{- плотность энтропии}$$

С падением температуры до примерно $100S_6$ ГэВ ($t \sim \frac{10^{-11}}{S_6^2}$ с) происходит закалка тяжелых кварков. Скорость аннигиляции свободных кварков становится равной скорости расширения Вселенной:

$$R(T_f) = H(T_f)$$

Дальнейшее изменение концентраций определяется только расширением Вселенной.

$$\begin{cases} \frac{dn_U}{dt} + 3Hn_U = \langle \sigma v \rangle (n_{eqU}n_{eq\bar{U}} - n_Un_{\bar{U}}) \\ \frac{dn_{\bar{U}}}{dt} + 3Hn_U = \langle \sigma v \rangle (n_{eqU}n_{eq\bar{U}} - n_Un_{\bar{U}}) \end{cases}$$

$$n_{eq} = g_S \left(\frac{mT}{2\pi} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{m}{T} \right)$$

$$n_{eq\ U, \bar{U}} = n_{eq} \exp \left(\pm \frac{\mu}{T} \right)$$

$$\begin{cases} r_+(x \approx 0) \approx \frac{\kappa r_{+f}}{(\kappa + r_{+f})e^{\kappa J} - r_{+f}} \\ r_-(x \approx 0) \approx \frac{\kappa r_{-f}}{r_{-f} - (r_{-f} - \kappa)e^{-\kappa J}} \end{cases}, \text{ где } J = \frac{1.3 \cdot 10^{12}}{S_6 \left(1 - \frac{\ln S_6}{30}\right)}$$

$$x = \frac{T}{m_U}$$

$$r_{\pm f} = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{J} \pm \kappa \right)$$

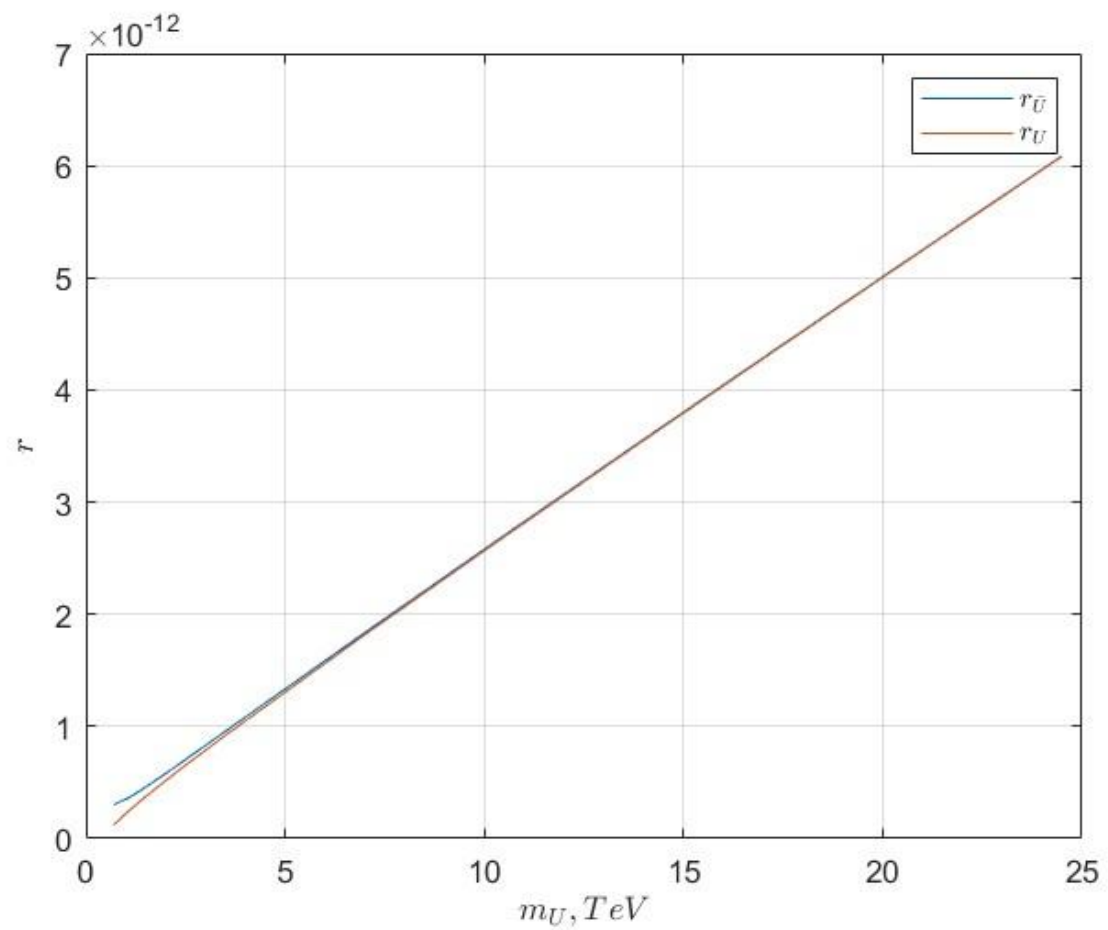


График зависимости r_U и $r_{\bar{U}}$ от m_U

При температуре порядка $\alpha^2 m/4 = 10 S_6$ ГэВ ($t \sim \frac{10^{-10}}{S_6^2}$ с) становится эффективным процесс кластеризации.

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

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

$$\tau_0 = \frac{2}{m_U \alpha^5} \quad \text{- время жизни кваркония}$$

$$R = n \langle \sigma v \rangle \sim g_S T^3 * \frac{\alpha^2}{m_U^2} \approx g_s \frac{\alpha^8 m_U}{64}; \quad t \sim \frac{1}{R}, \quad g_S = 16 \Rightarrow t \sim \frac{4}{\alpha^8 m_U} \approx 2000 \tau_0$$

- время распада кваркония

$$U + U \rightleftharpoons UU + g$$

$$UU + U \rightarrow UUU$$

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

$$UUU + \bar{U} \rightarrow UU$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\langle \sigma v \rangle = \pi \left(\frac{m}{T} \right)^{0.9} \left(\frac{\alpha}{m} \right)^2 \quad [1]$$

$$\langle \sigma v \rangle_{UU+g} = \frac{64\pi^4 \cdot m_e e^{10}}{3\sqrt{3} \cdot ch^6} \frac{z^4}{\nu^3 n^5} \quad [2]$$

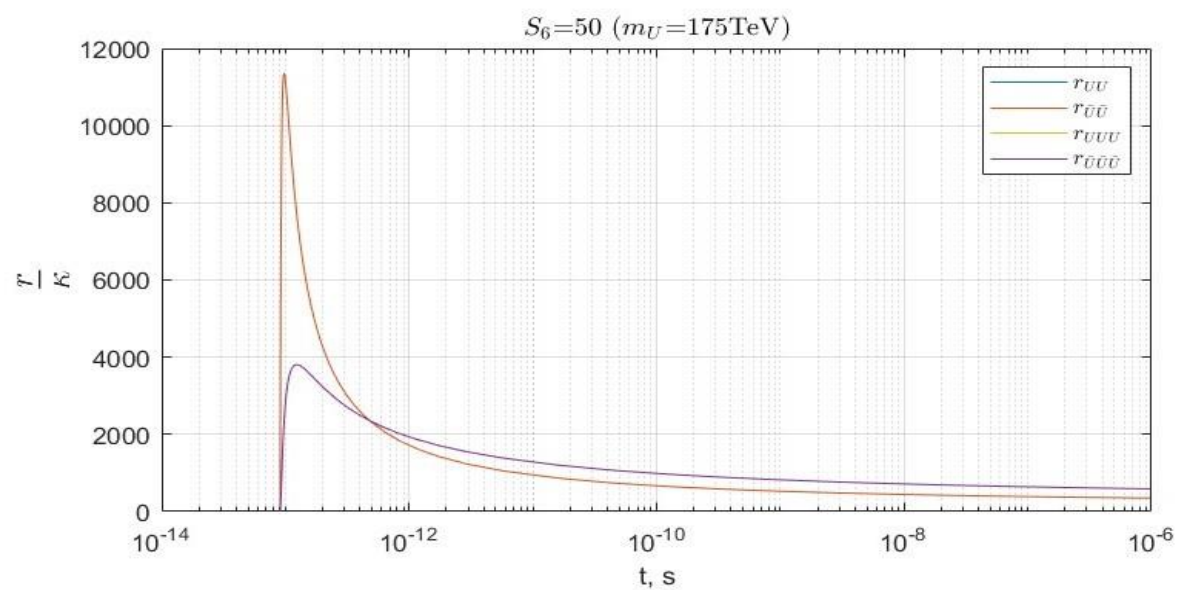
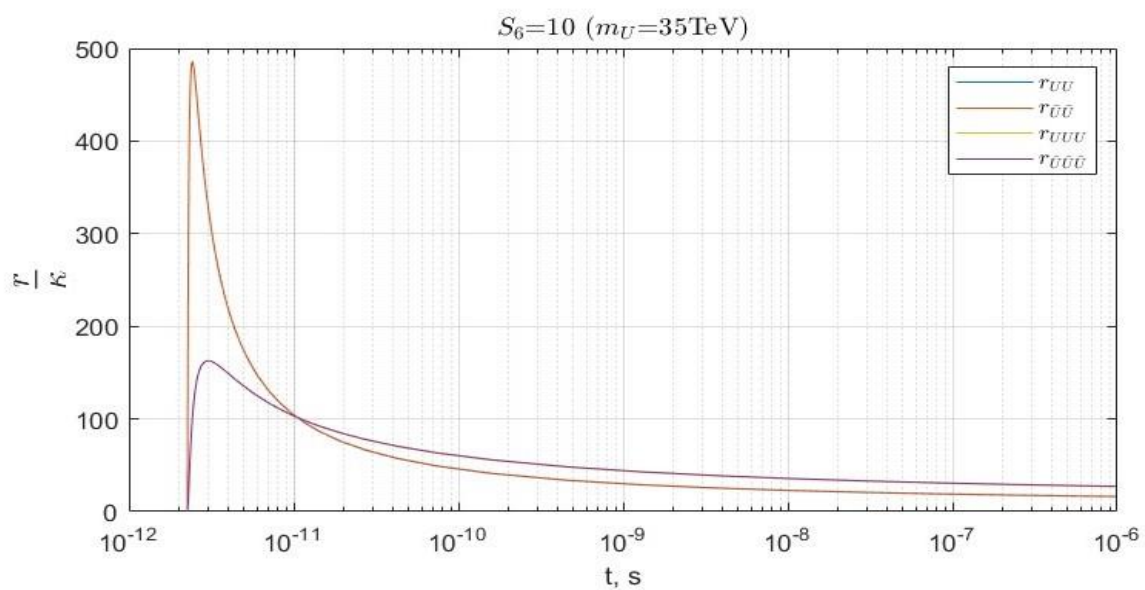
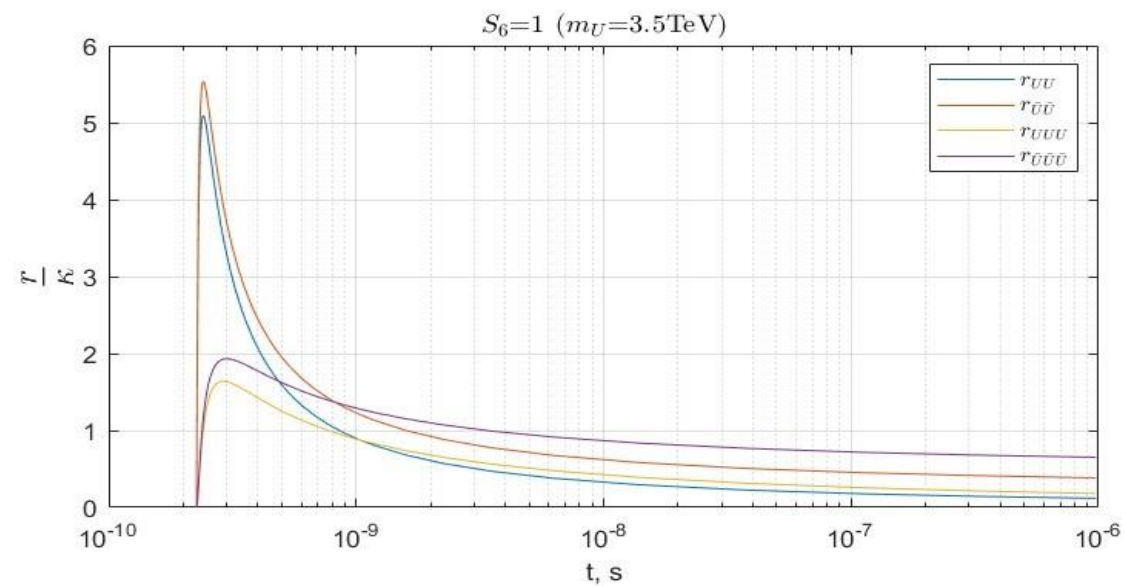
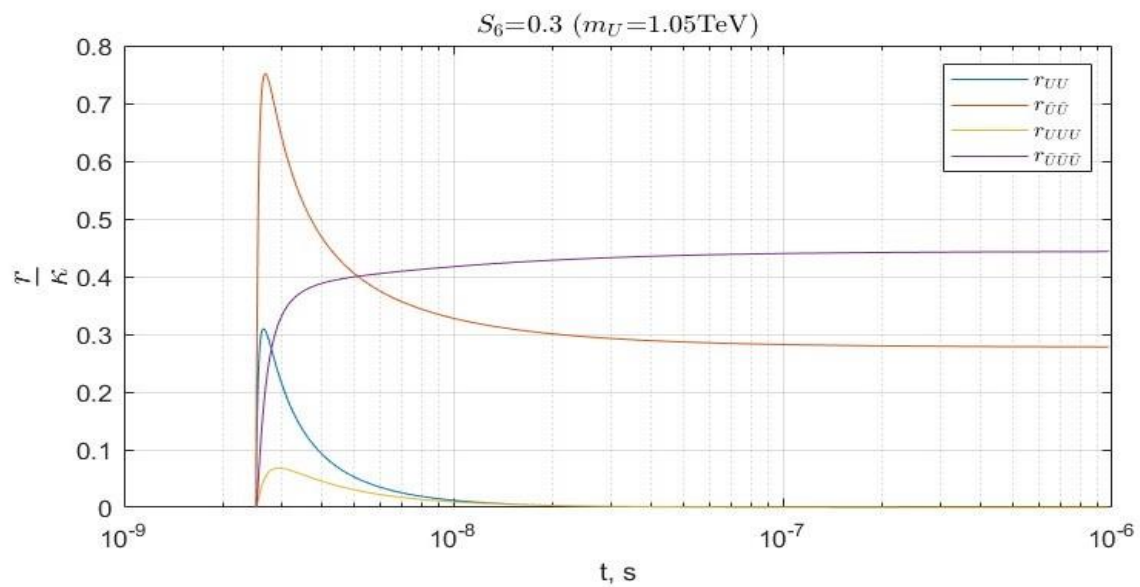
$$\downarrow$$

$$\langle \sigma v \rangle_{UU+g} = \frac{64\pi^4}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{\alpha^5 m_U}{T^3}$$

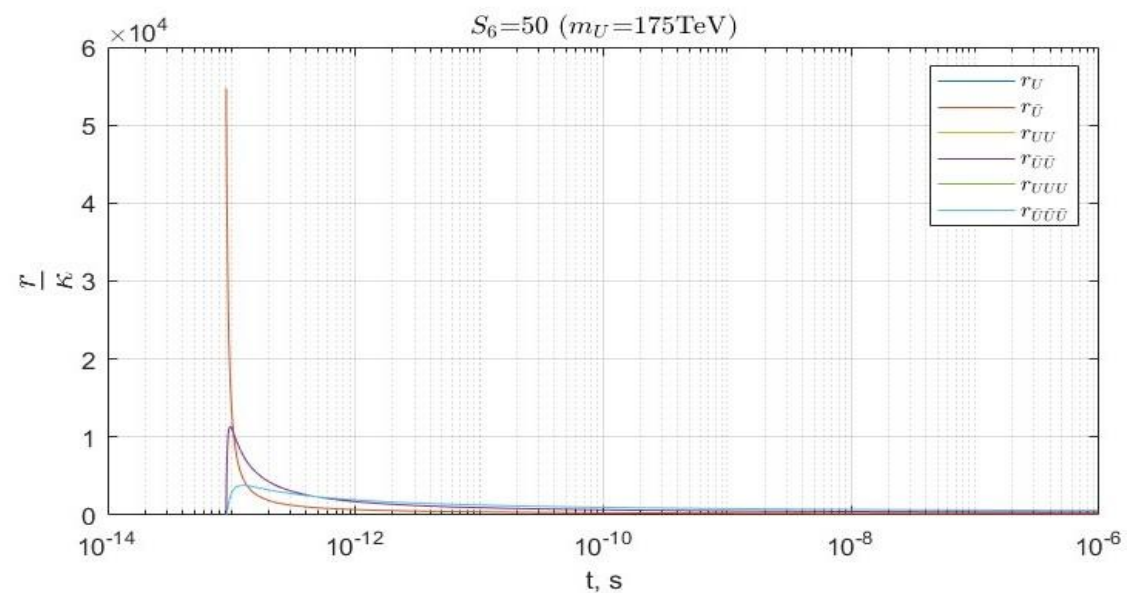
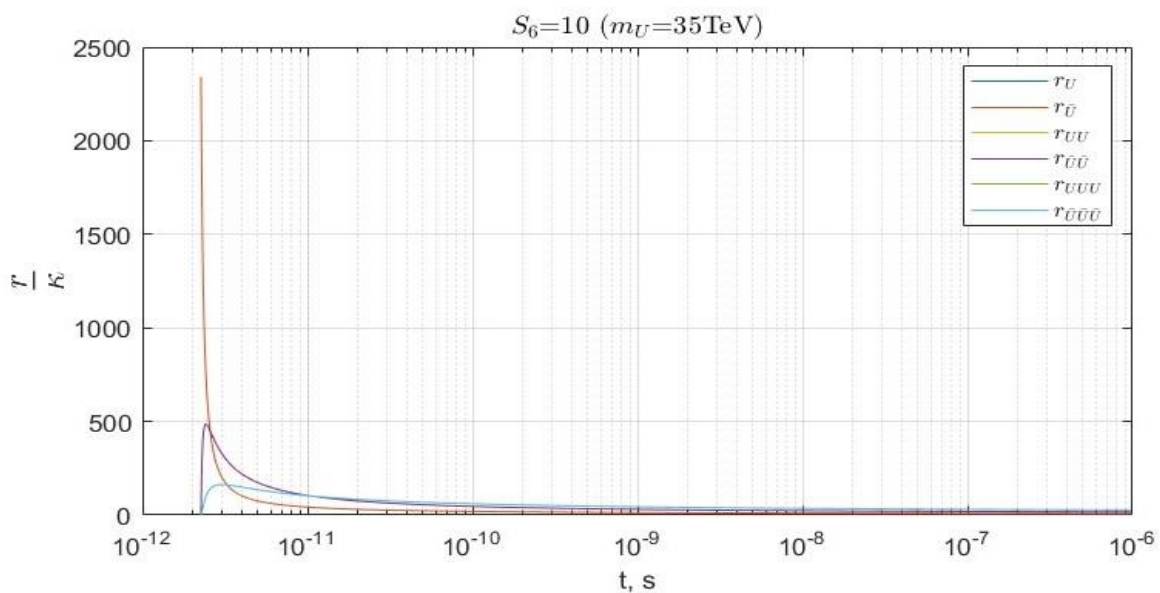
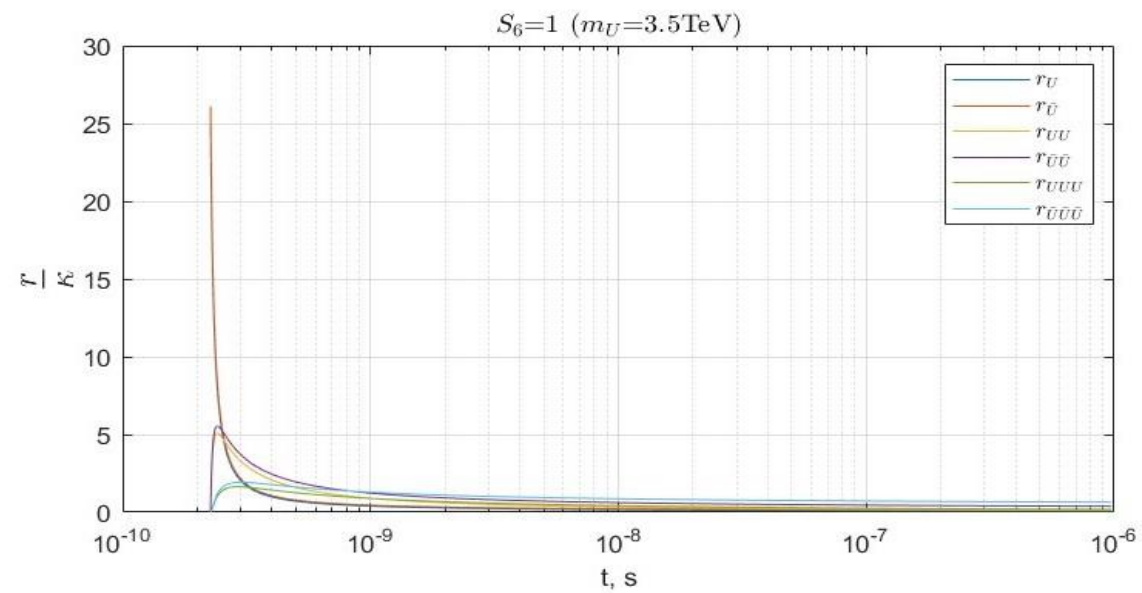
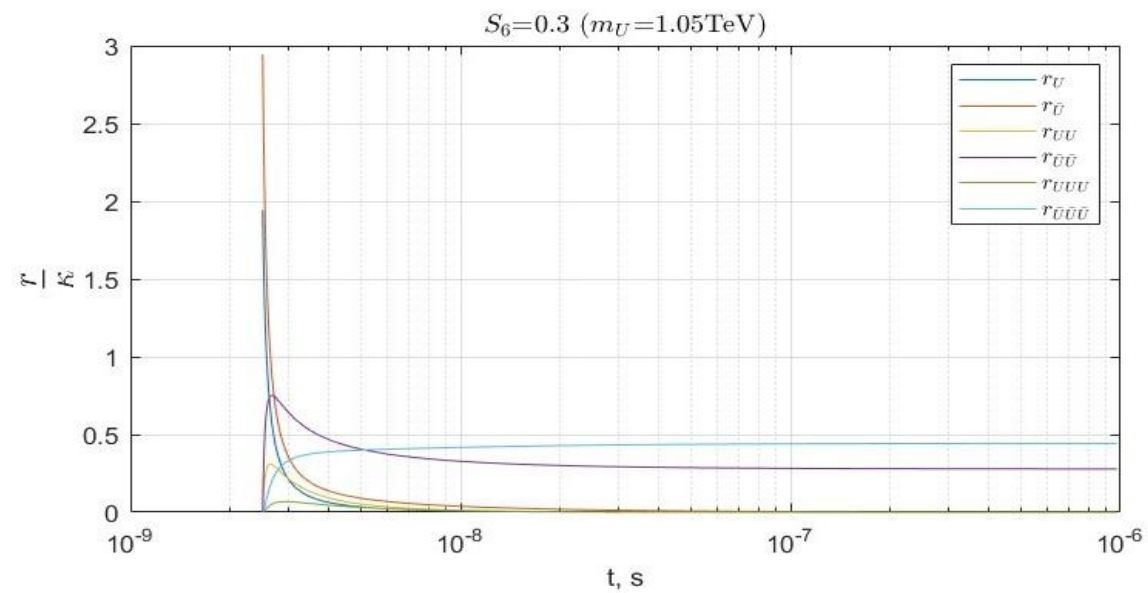
[1] K. Belotsky [и др.] May heavy hadrons of the 4th generation be hidden in our universe while close to detection?

[2] Lochte-Holtgreven W. "Plasma Diagnostics".

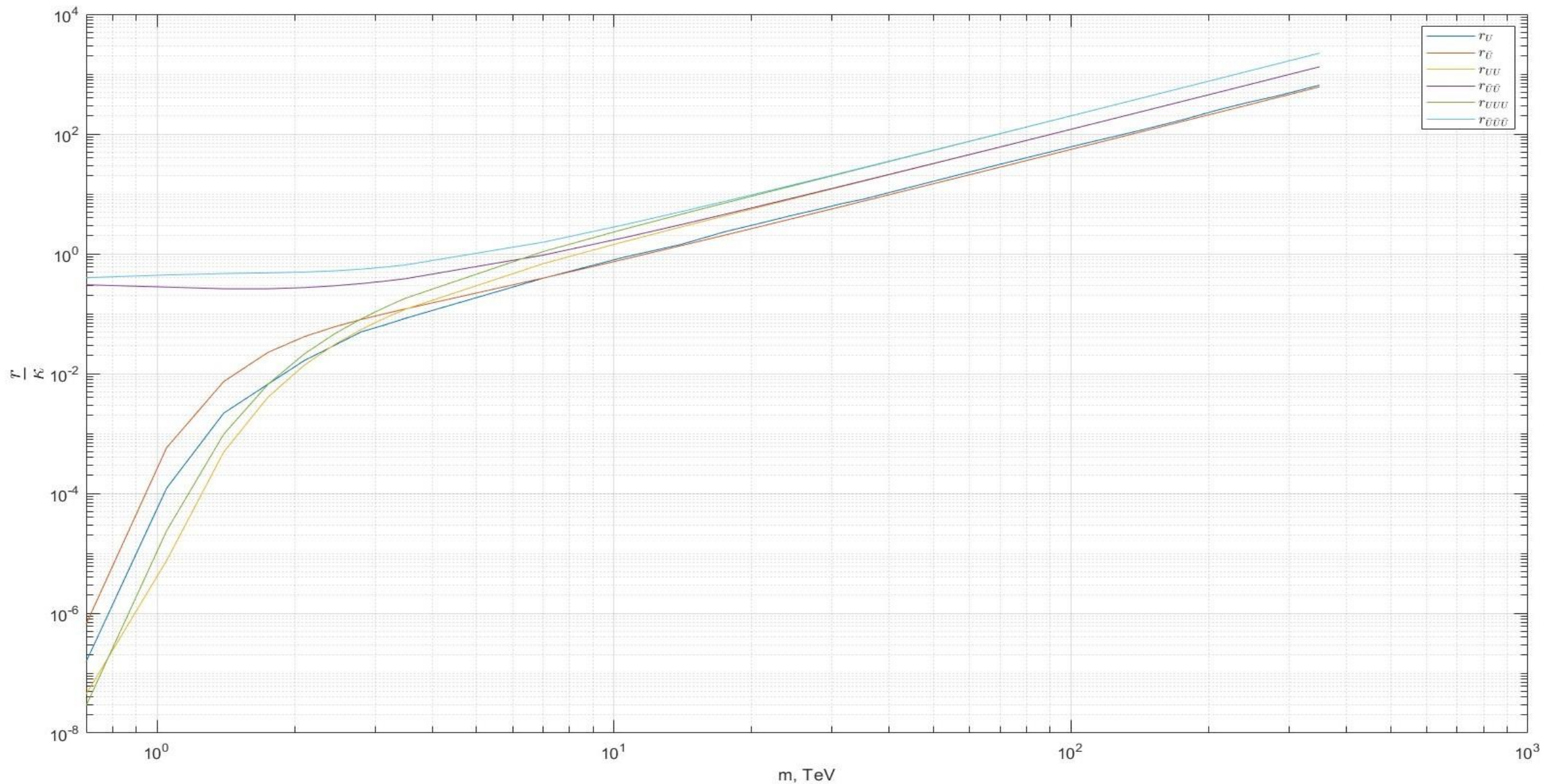
$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{dr_U}{dT} &= -\frac{\pi \cdot s}{HT} \left(\frac{m}{T}\right)^{9/10} \left(\frac{\alpha}{m}\right)^2 \left(-r_U^2 + \frac{64\pi^3 \alpha^3}{3\sqrt{3}} \left(\frac{m}{T}\right)^{2.1} r_{UU} r_g - r_U r_{\bar{U}} - \frac{r_U r_{UU}}{1.5^{1.1}} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{r_U r_{\bar{U}\bar{U}}}{1.5^{1.1}} - \frac{r_U r_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}}}{2^{1.1}} + \frac{r_{UU} r_{\bar{U}}}{1.5^{1.1}} + \frac{r_{UUU} r_{\bar{U}\bar{U}}}{2.5^{1.1}} \right) \\
 \frac{dr_{UU}}{dT} &= -\frac{\pi \cdot s}{HT} \left(\frac{m}{T}\right)^{9/10} \left(\frac{\alpha}{m}\right)^2 \left(r_U^2 - \frac{64\pi^3 \alpha^3}{3\sqrt{3}} \left(\frac{m}{T}\right)^{2.1} r_{UU} r_g - \frac{r_U r_{UU}}{1.5^{1.1}} - \frac{r_{UU} r_{\bar{U}}}{1.5^{1.1}} - \frac{r_{UU} r_{\bar{U}\bar{U}}}{2^{1.1}} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{r_{UUU} r_{\bar{U}}}{2^{1.1}} - \frac{r_{UU} r_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}}}{2.5^{1.1}} \right) \\
 \frac{dr_{UUU}}{dT} &= -\frac{\pi \cdot s}{HT} \left(\frac{m}{T}\right)^{9/10} \left(\frac{\alpha}{m}\right)^2 \left(\frac{r_U r_{UU}}{1.5^{1.1}} - \frac{r_{UUU} r_{\bar{U}}}{2^{1.1}} - \frac{r_{UUU} r_{\bar{U}\bar{U}}}{2.5^{1.1}} - \frac{r_{UUU} r_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}}}{3^{1.1}} \right) \\
 \frac{dr_{\bar{U}}}{dT} &= -\frac{\pi \cdot s}{HT} \left(\frac{m}{T}\right)^{9/10} \left(\frac{\alpha}{m}\right)^2 \left(-r_{\bar{U}}^2 + \frac{64\pi^3 \alpha^3}{3\sqrt{3}} \left(\frac{m}{T}\right)^{2.1} r_{\bar{U}\bar{U}} r_g - r_U r_{\bar{U}} - \frac{r_{\bar{U}} r_{\bar{U}\bar{U}}}{1.5^{1.1}} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{r_{\bar{U}} r_{UU}}{1.5^{1.1}} - \frac{r_{\bar{U}} r_{UUU}}{2^{1.1}} + \frac{r_{\bar{U}\bar{U}} r_U}{1.5^{1.1}} + \frac{r_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}} r_{UU}}{2.5^{1.1}} \right) \\
 \frac{dr_{\bar{U}\bar{U}}}{dT} &= -\frac{\pi \cdot s}{HT} \left(\frac{m}{T}\right)^{9/10} \left(\frac{\alpha}{m}\right)^2 \left(r_{\bar{U}}^2 - \frac{64\pi^3 \alpha^3}{3\sqrt{3}} \left(\frac{m}{T}\right)^{2.1} r_{\bar{U}\bar{U}} r_g - \frac{r_{\bar{U}} r_{\bar{U}\bar{U}}}{1.5^{1.1}} - \frac{r_U r_{\bar{U}\bar{U}}}{1.5^{1.1}} - \frac{r_{UU} r_{\bar{U}\bar{U}}}{2^{1.1}} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{r_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}} r_U}{2^{1.1}} - \frac{r_{\bar{U}\bar{U}} r_{UUU}}{2.5^{1.1}} \right) \\
 \frac{dr_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}}}{dT} &= -\frac{\pi \cdot s}{HT} \left(\frac{m}{T}\right)^{9/10} \left(\frac{\alpha}{m}\right)^2 \left(\frac{r_{\bar{U}} r_{\bar{U}\bar{U}}}{1.5^{1.1}} - \frac{r_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}} r_U}{2^{1.1}} - \frac{r_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}} r_{UU}}{2.5^{1.1}} - \frac{r_{UUU} r_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}}}{3^{1.1}} \right)
 \end{aligned} \right.$$



Графики зависимости $\frac{r}{k}$ от t



Графики зависимости $\frac{r}{k}$ от t



Графики зависимости $\frac{r}{\kappa}$ от m_U к моменту фазового КХД перехода

$$\langle \sigma v \rangle_{ion} = \int_I^{\text{inf}} \left(\frac{d\langle \sigma v \rangle_1}{dE_g} + \frac{d\langle \sigma v \rangle_2}{dE_g} \right) \frac{dE_g}{\exp(E_g/T) - 1}$$

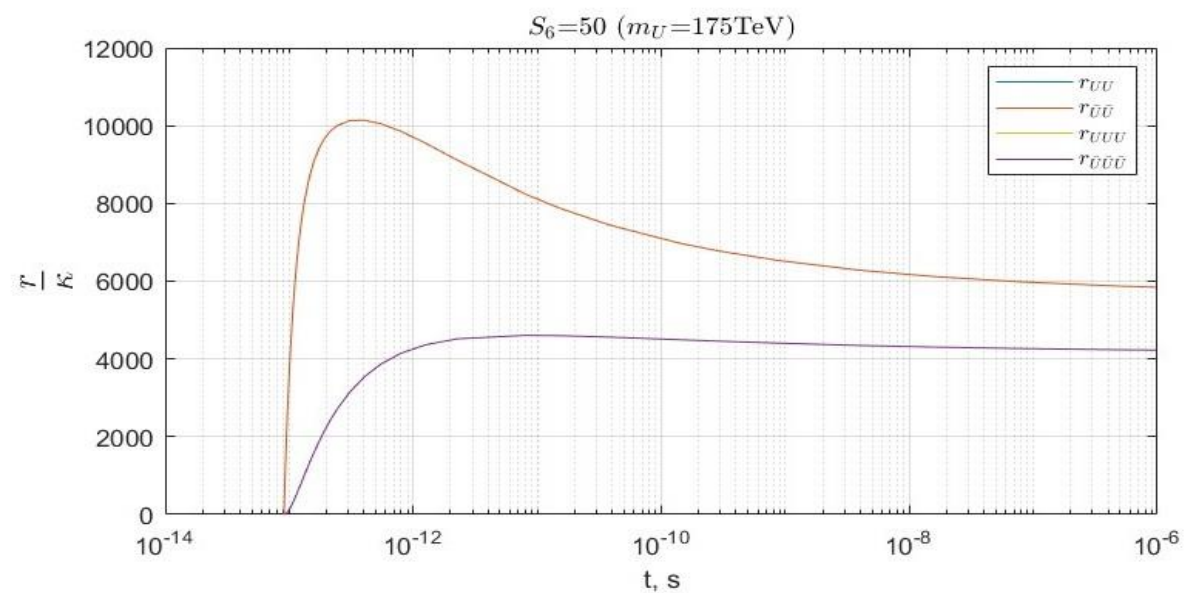
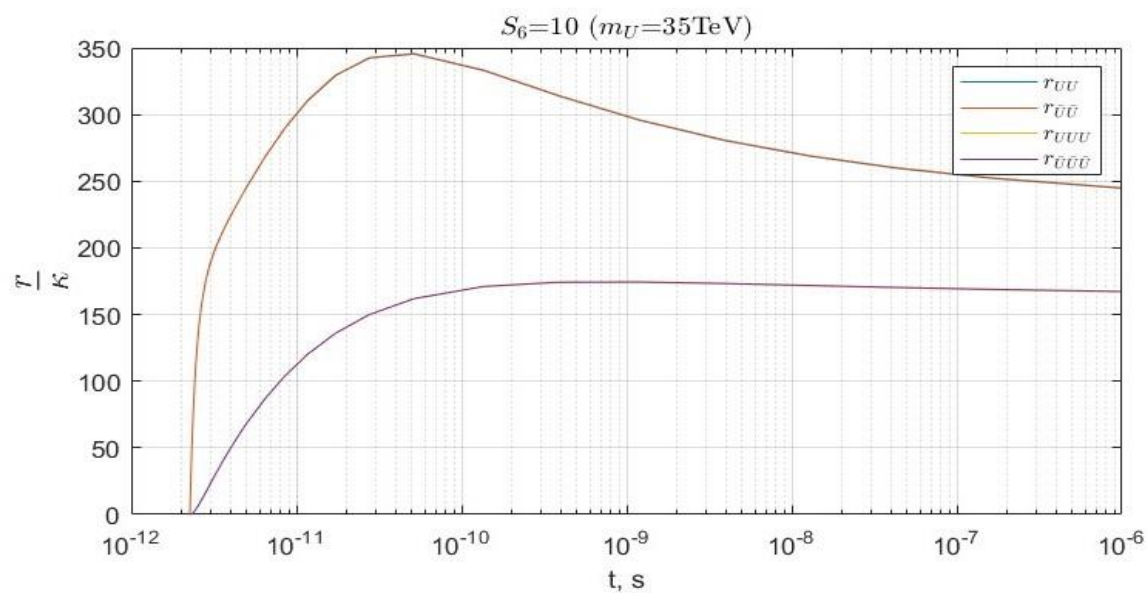
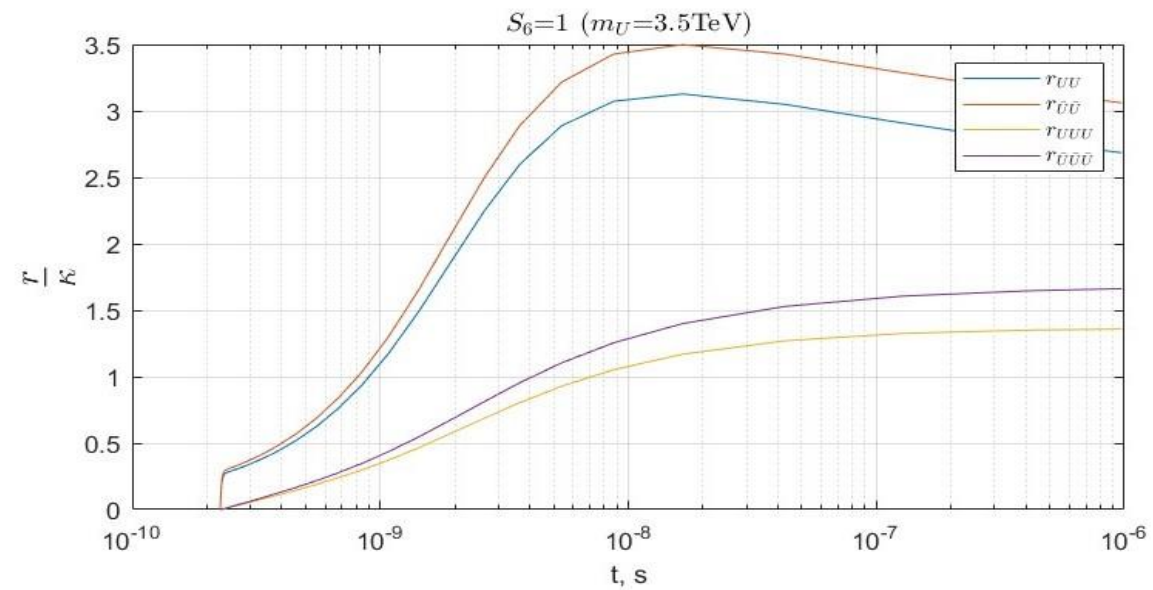
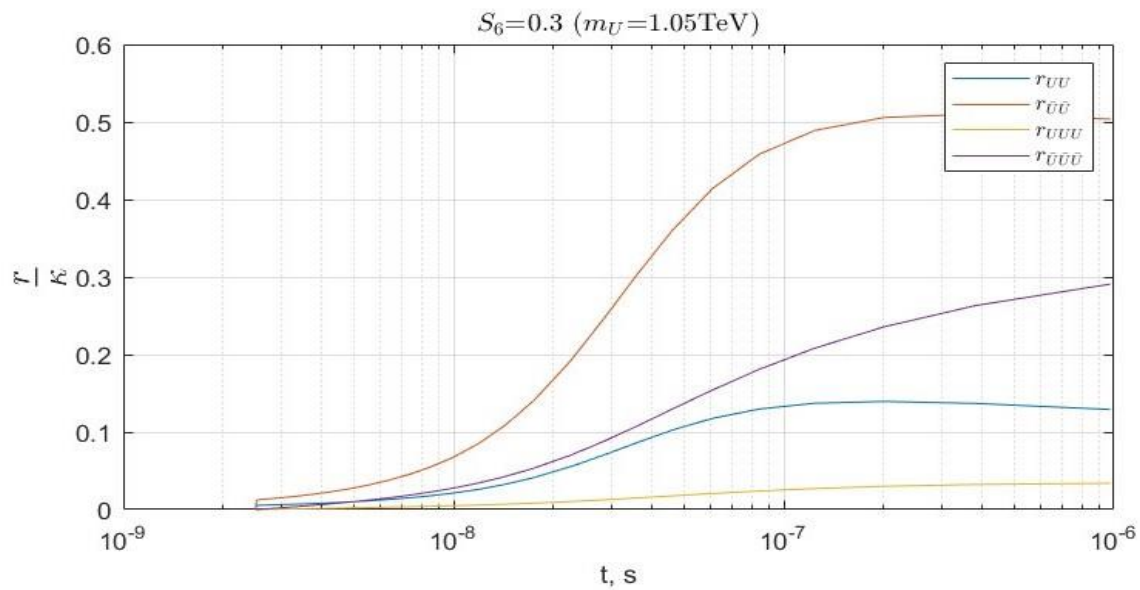
$$\begin{aligned} \langle \sigma v \rangle_1 = & \frac{\pi\alpha}{(m_q E_g)} \frac{2^{4l} l^2 (n+1)! \{(1+\eta^2) \dots [(l-1)^2 + \eta^2]\}}{3 (2l+1)!(2l-1)!(n-l-1)!} \\ & \times \frac{\exp[-4\eta \cot \rho^{-1}]}{1 - e^{-2\pi\eta}} \frac{\rho^{2l+2}}{(1+\rho^2)^{2n-2}} \times [G_l(l, l+1-n, \eta, \rho) - \frac{1}{(1+\rho^2)^2} G_l(l, l-1-n, \eta, \rho)]^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle \sigma v \rangle_2 = & \frac{\pi\alpha}{(m_q E_g)} \frac{2^{4l+6}}{3} \frac{(l+1)^2 (n+1)! \{(1+\eta^2) \dots [(l+1)^2 + \eta^2]\}}{(2l+1)(2l+1)!(2l+21)!(n-l-1)![(l+1)^2 + \eta^2]} \\ & \times \frac{\exp[-4\eta \cot \rho^{-1}]}{1 - e^{-2\pi\eta}} \frac{\rho^{2l+4}\eta^2}{(1+\rho^2)^{2n}} \times [(l+1-n)G_{l+1}(l, l+1-n, \eta, \rho) - \frac{l+1+n}{1+\rho^2} G_{l+1}(l, l-n, \eta, \rho)]^2 \end{aligned}$$

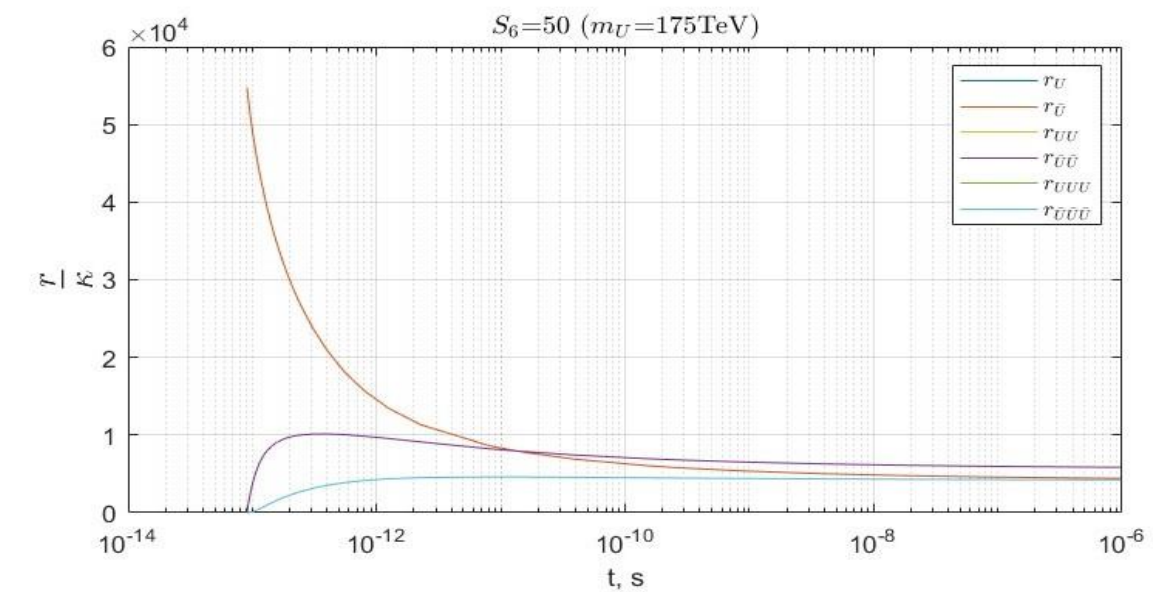
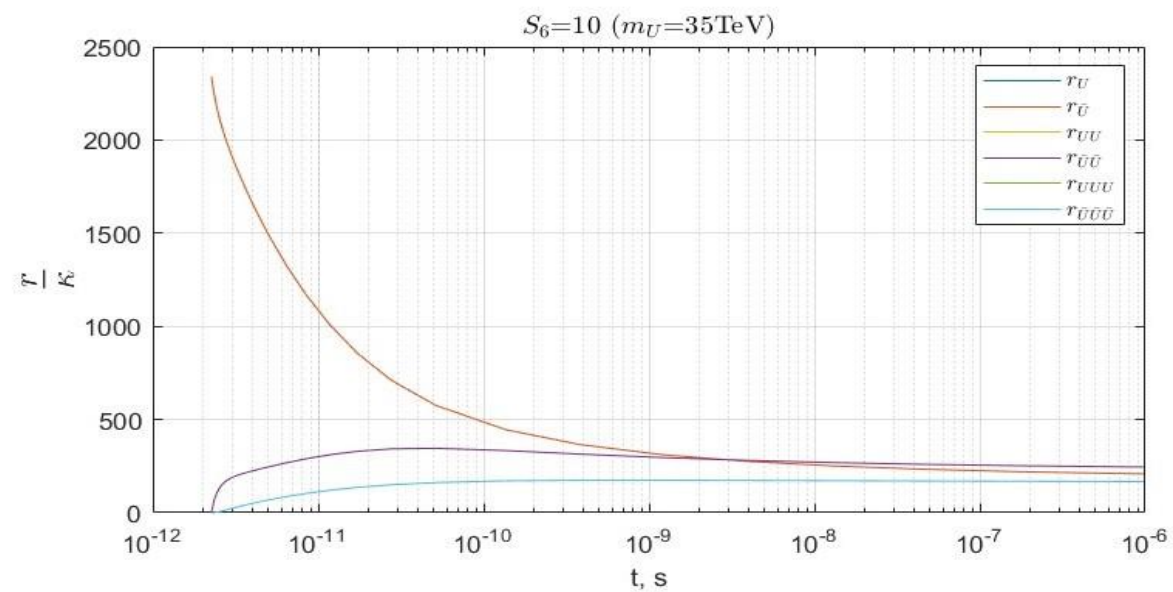
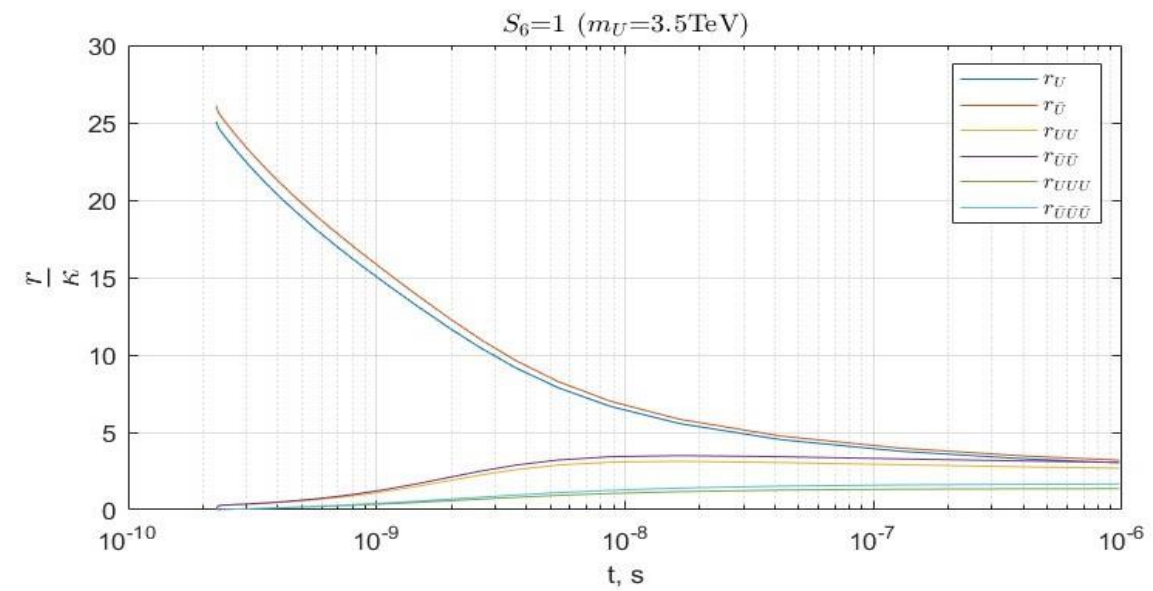
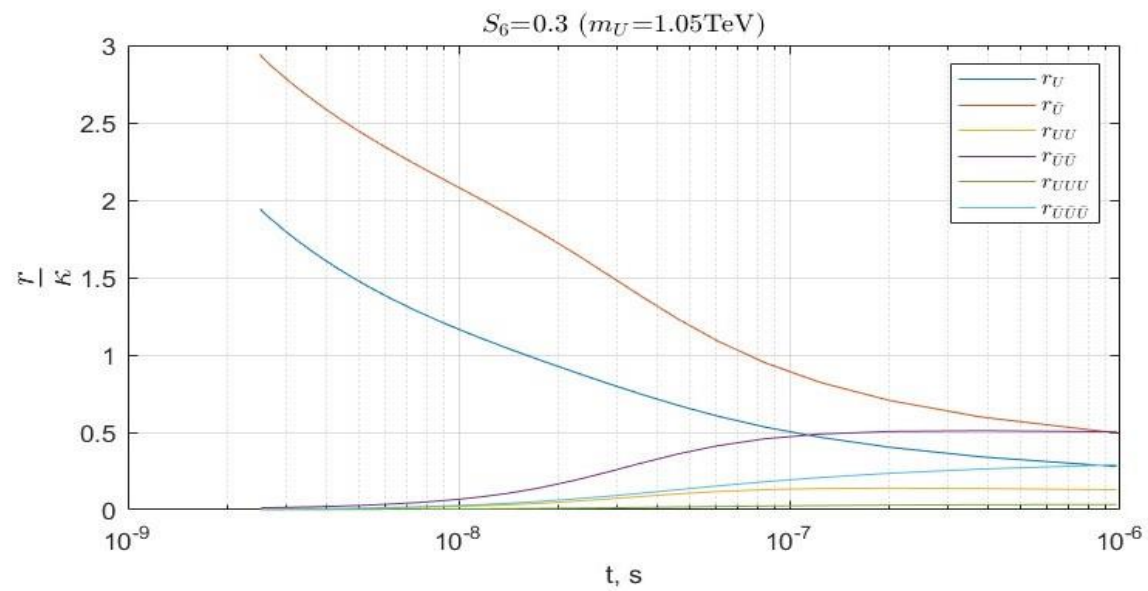
$$\sigma_{rec} = \frac{2^8 \pi^2}{3} \frac{\eta^6 e^{4\eta \arctan(1/\eta)}}{(1 - e^{-2\pi\eta})(\eta^2 + 1)^2 \mu} \frac{\alpha 1.202 + 0.5782 \ln \eta^2 + 1 + 0.2148 \ln \eta^2 + 1^2}{1 + 0.3425 \ln \eta^2 + 1}$$

$$G_l(-m, \eta, \rho) = \sum_{s=0}^{2m} b_s \rho^s; \quad \eta = \sqrt{\frac{I}{E_g - I}}; \quad \rho = \eta/n$$

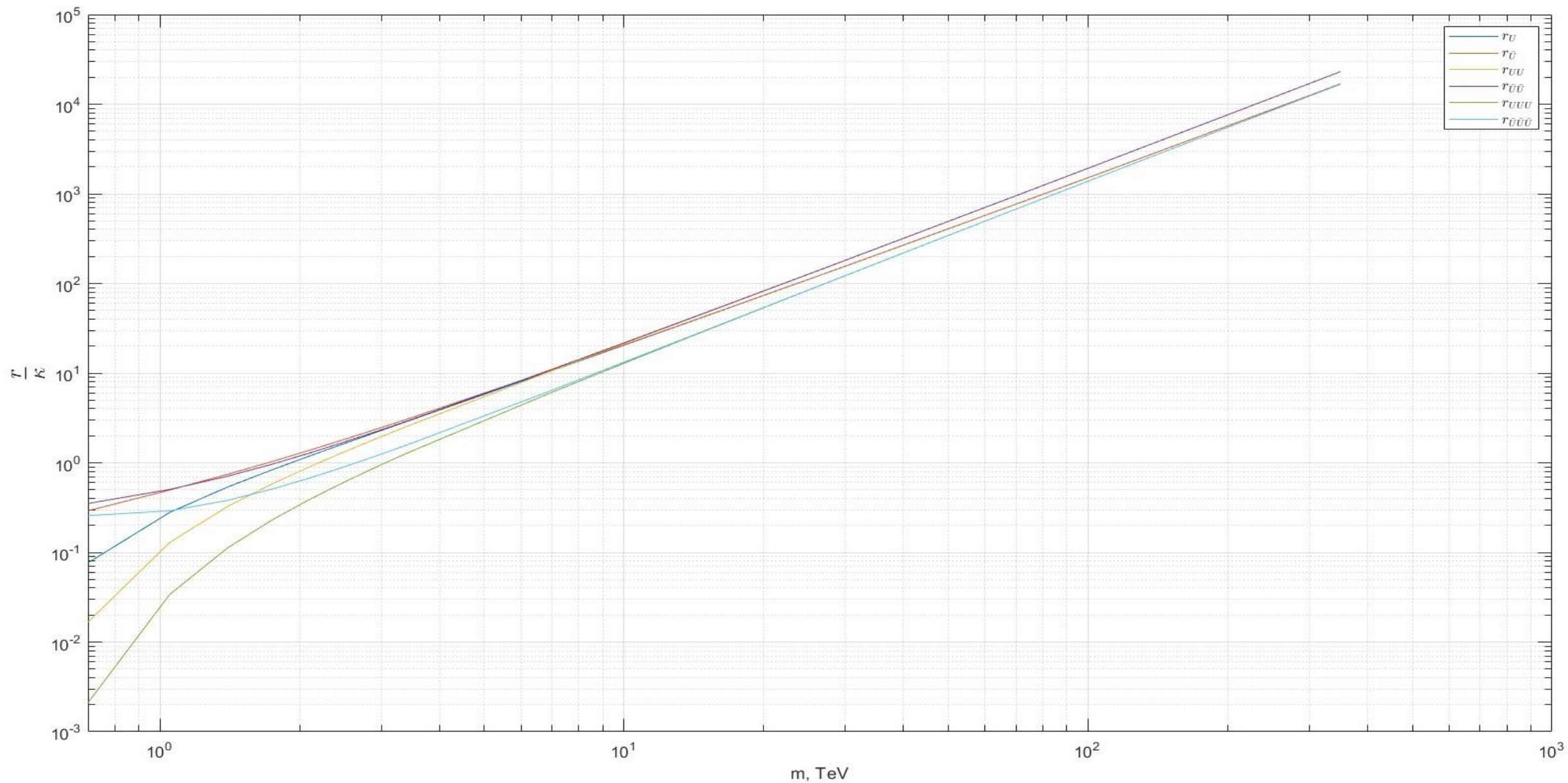
$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{dr_U}{dT} &= -\frac{s}{HT} \left(-\langle \sigma v \rangle_{rec11} r_U^2 + \langle \sigma v \rangle_{ion} r_{UU} r_g - \langle \sigma v \rangle_{rec11} r_U r_{\bar{U}} - \langle \sigma v \rangle_{rec12} r_U r_{UU} \right. \\
 &\quad \left. - \langle \sigma v \rangle_{rec12} r_U r_{\bar{U}\bar{U}} - \langle \sigma v \rangle_{rec13} r_U r_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}} + \langle \sigma v \rangle_{rec12} r_{UU} r_{\bar{U}} + \langle \sigma v \rangle_{rec23} r_{UUU} r_{\bar{U}\bar{U}} \right) \\
 \frac{dr_{UU}}{dT} &= -\frac{s}{HT} \left(\langle \sigma v \rangle_{rec11} r_U^2 - \langle \sigma v \rangle_{ion} r_{UU} r_g - \langle \sigma v \rangle_{rec12} r_U r_{UU} - \langle \sigma v \rangle_{rec12} r_{UU} r_{\bar{U}} \right. \\
 &\quad \left. - \langle \sigma v \rangle_{rec22} r_{UU} r_{\bar{U}\bar{U}} + \langle \sigma v \rangle_{rec13} r_{UUU} r_{\bar{U}} - \langle \sigma v \rangle_{rec23} r_{UUU} r_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}} \right) \\
 \frac{dr_{UUU}}{dT} &= -\frac{s}{HT} \left(\langle \sigma v \rangle_{rec12} r_U r_{UU} - \langle \sigma v \rangle_{rec13} r_{UUU} r_{\bar{U}} - \langle \sigma v \rangle_{rec23} r_{UUU} r_{\bar{U}\bar{U}} - \langle \sigma v \rangle_{rec33} r_{UUU} r_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}} \right) \\
 \frac{dr_{\bar{U}}}{dT} &= -\frac{s}{HT} \left(-\langle \sigma v \rangle_{rec11} r_{\bar{U}}^2 + \langle \sigma v \rangle_{ion} r_{\bar{U}\bar{U}} r_g - \langle \sigma v \rangle_{rec11} r_U r_{\bar{U}} - \langle \sigma v \rangle_{rec12} r_{\bar{U}} r_{\bar{U}\bar{U}} \right. \\
 &\quad \left. - \langle \sigma v \rangle_{rec12} r_{\bar{U}} r_{UU} - \langle \sigma v \rangle_{rec13} r_{\bar{U}} r_{UUU} + \langle \sigma v \rangle_{rec12} r_{\bar{U}\bar{U}} r_U + \langle \sigma v \rangle_{rec23} r_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}} r_{UU} \right) \\
 \frac{dr_{\bar{U}\bar{U}}}{dT} &= -\frac{s}{HT} \left(\langle \sigma v \rangle_{rec11} r_{\bar{U}}^2 - \langle \sigma v \rangle_{ion} r_{\bar{U}\bar{U}} r_g - \langle \sigma v \rangle_{rec12} r_{\bar{U}} r_{\bar{U}\bar{U}} - \langle \sigma v \rangle_{rec12} r_U r_{\bar{U}\bar{U}} - \langle \sigma v \rangle_{rec22} r_{UU} r_{\bar{U}\bar{U}} \right. \\
 &\quad \left. + \langle \sigma v \rangle_{rec13} r_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}} r_U - \langle \sigma v \rangle_{rec23} r_{\bar{U}\bar{U}} r_{UUU} \right) \\
 \frac{dr_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}}}{dT} &= -\frac{s}{HT} \left(\langle \sigma v \rangle_{rec12} r_{\bar{U}} r_{\bar{U}\bar{U}} - \langle \sigma v \rangle_{rec13} r_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}} r_U - \langle \sigma v \rangle_{rec23} r_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}} r_{UU} - \langle \sigma v \rangle_{rec33} r_{UUU} r_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}} \right)
 \end{aligned} \right.$$



Графики зависимости $\frac{r}{k}$ от t



Графики зависимости $\frac{r}{k}$ от t



Графики зависимости $\frac{r}{\kappa}$ от m_U к моменту фазового КХД перехода

В ходе работы рассмотрены зарядово-асимметричная модели существования новых тяжелых кварков. В двух разных приближениях приведены расчеты и построены графики зависимости концентраций тяжелых кварков от их массы вплоть до момента начала их объединения с легкими кварками.

В дальнейшем проведенный анализ будет использован для выявления стабильных положительно заряженных частиц или частиц с нечетным отрицательным зарядом, являющимися возможными кандидатами на роль источника аномальных изотопов водорода и других элементов. Поскольку рассматриваемая асимметричная модель предсказывает существование отрицательных дважды заряженных частиц, которые могут образовывать темные атомы, составляющие основную долю скрытой массы, вопрос о производстве аномальных изотопов, сопутствующих образованию темных атомов, является критически важным для этого направления и будет предметом дальнейших исследований.

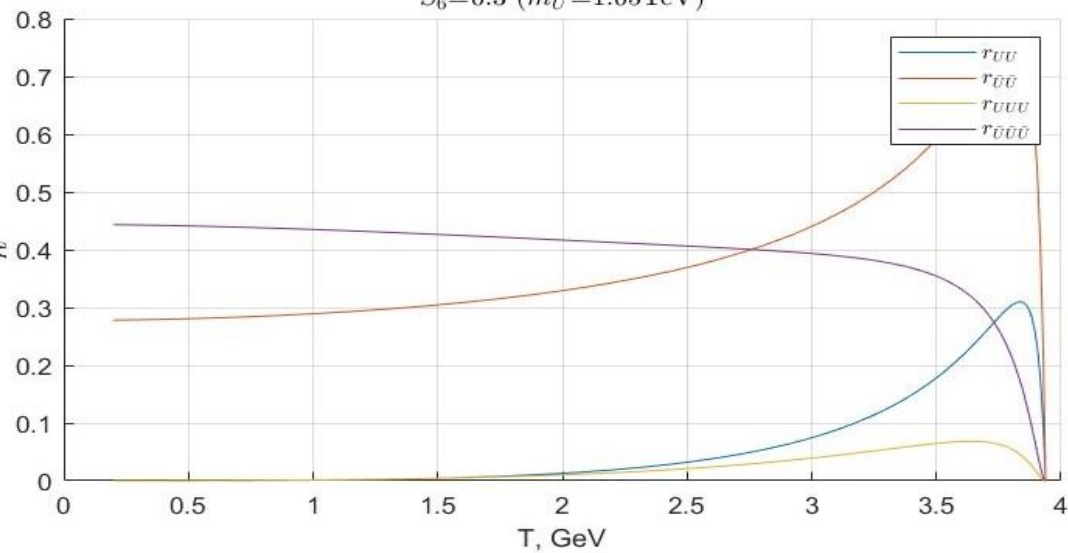
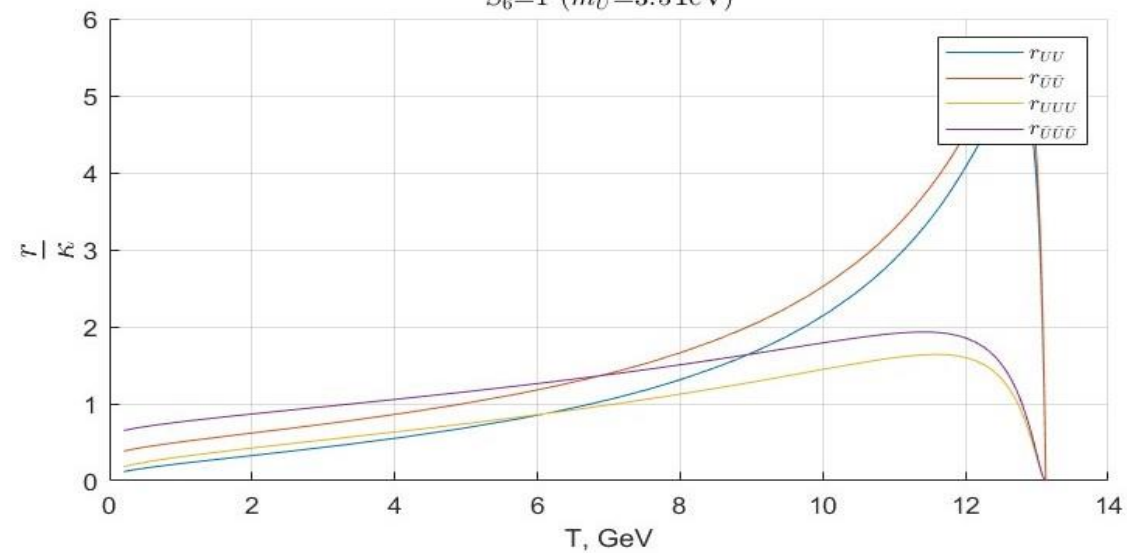
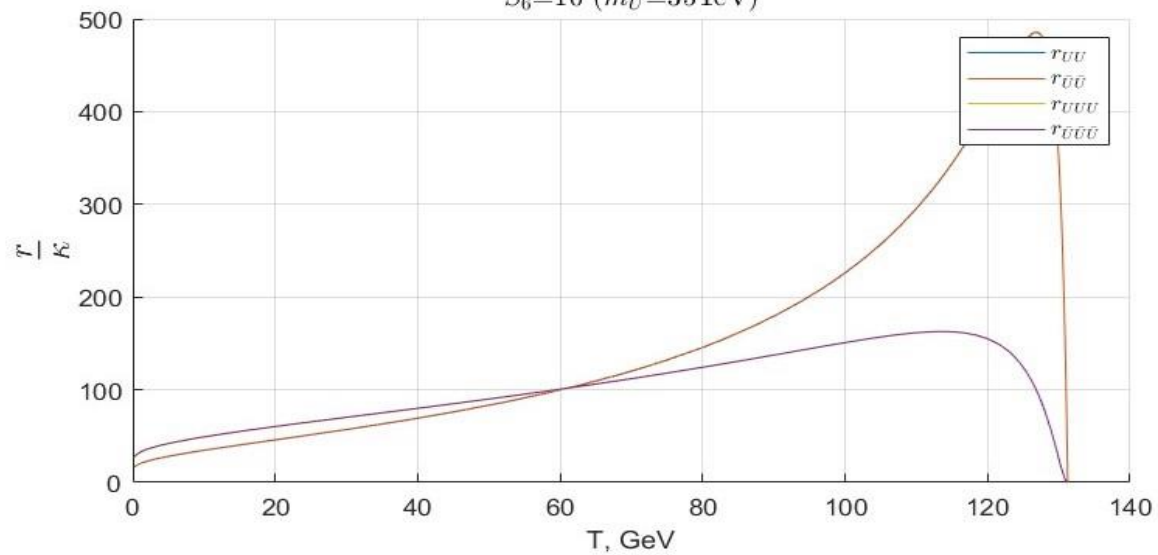
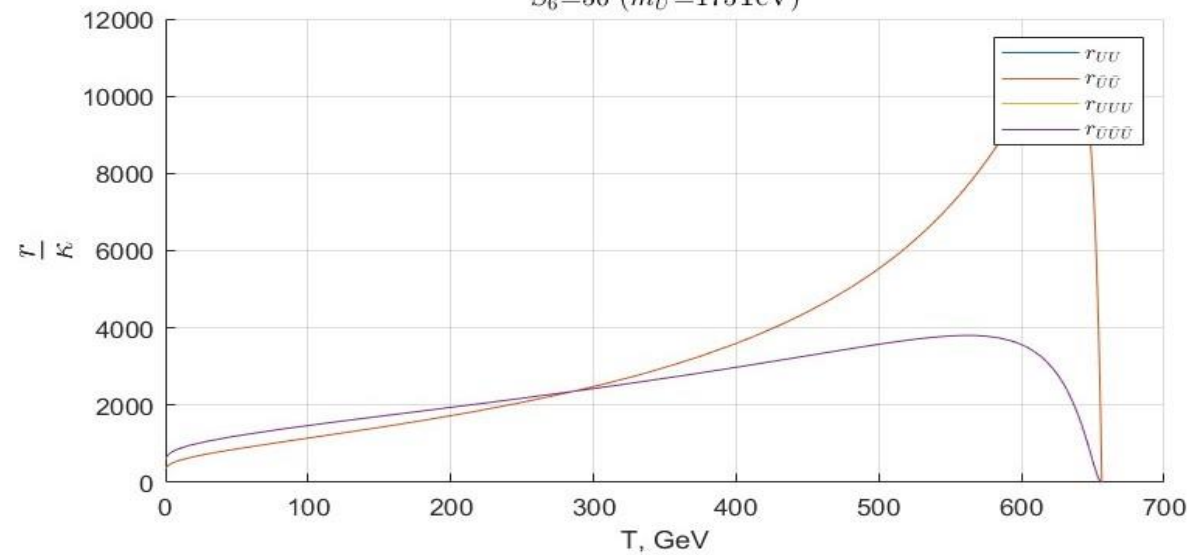
Спасибо за внимание!

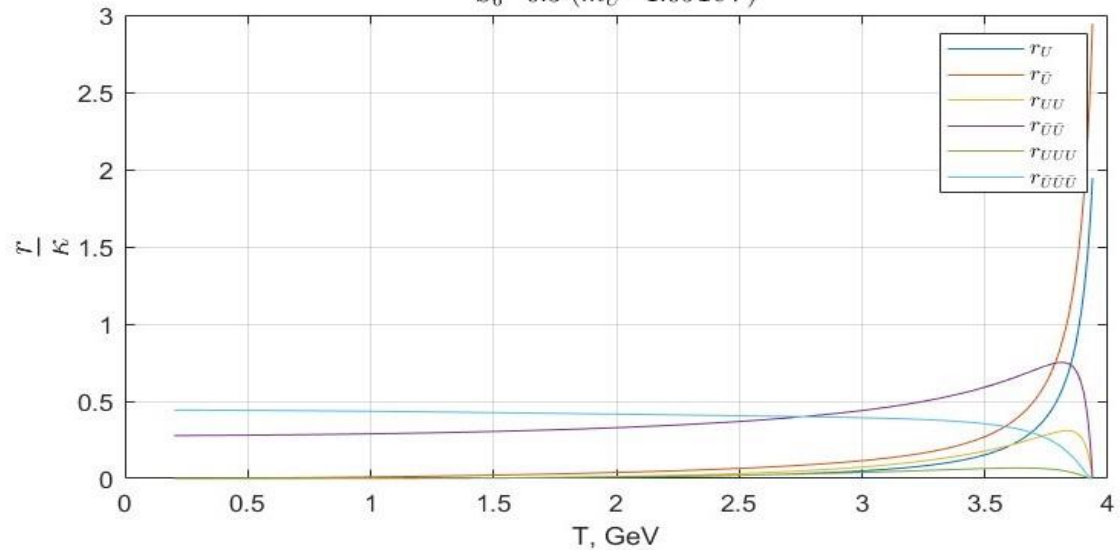
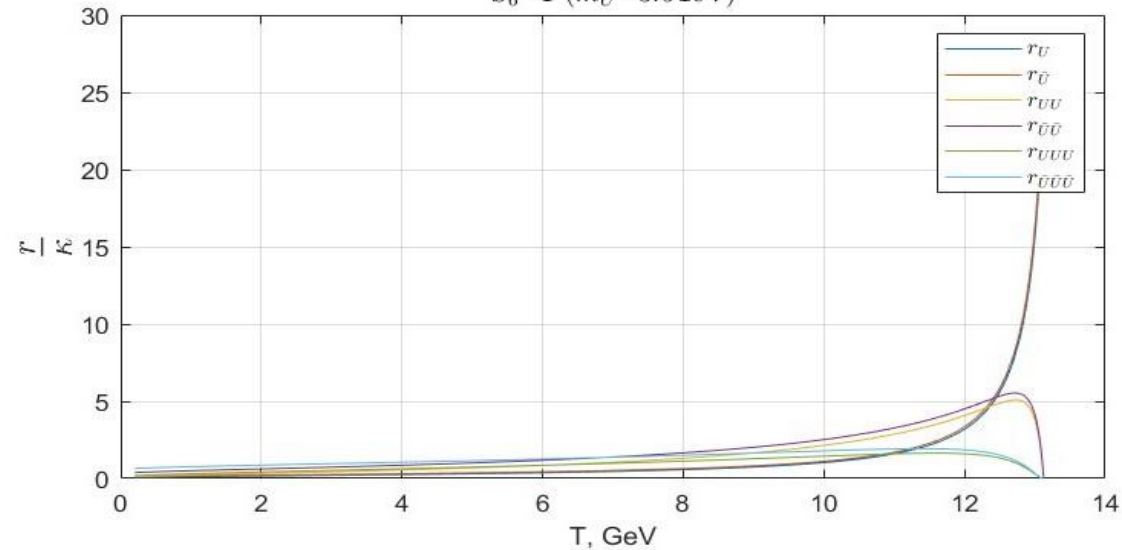
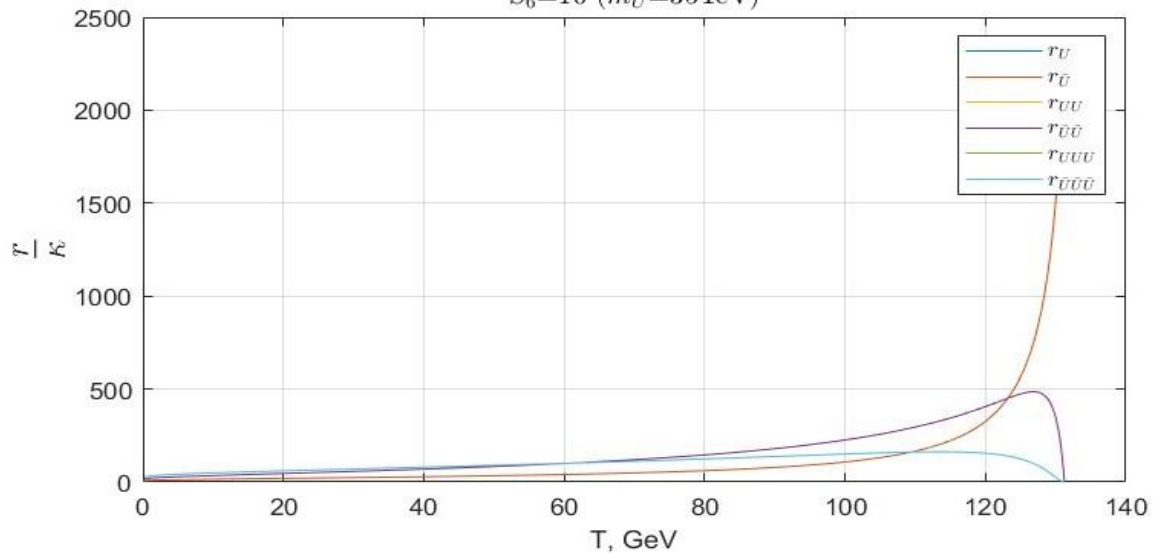
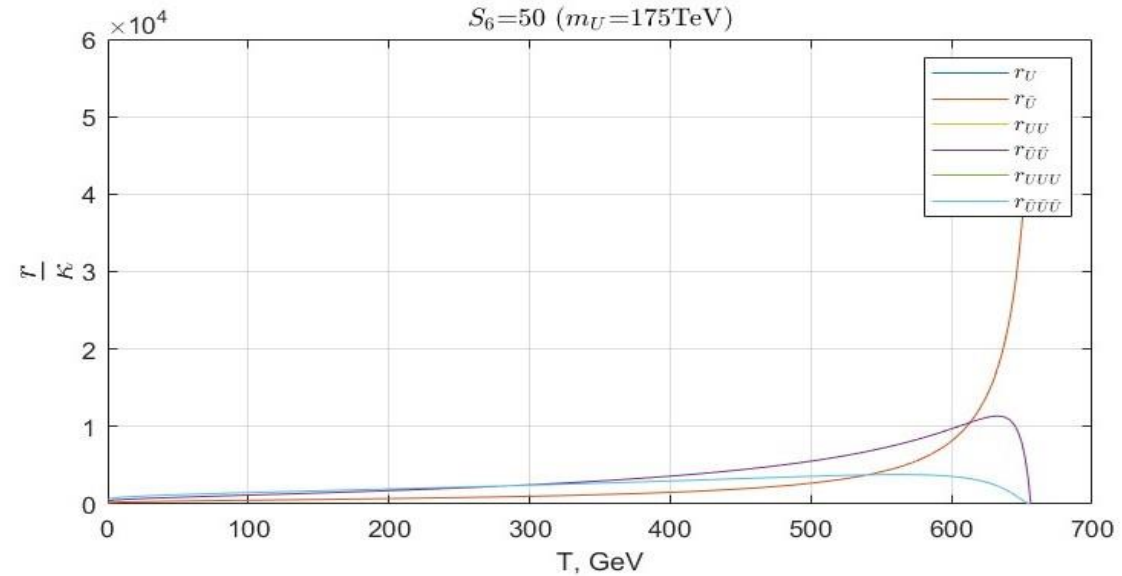


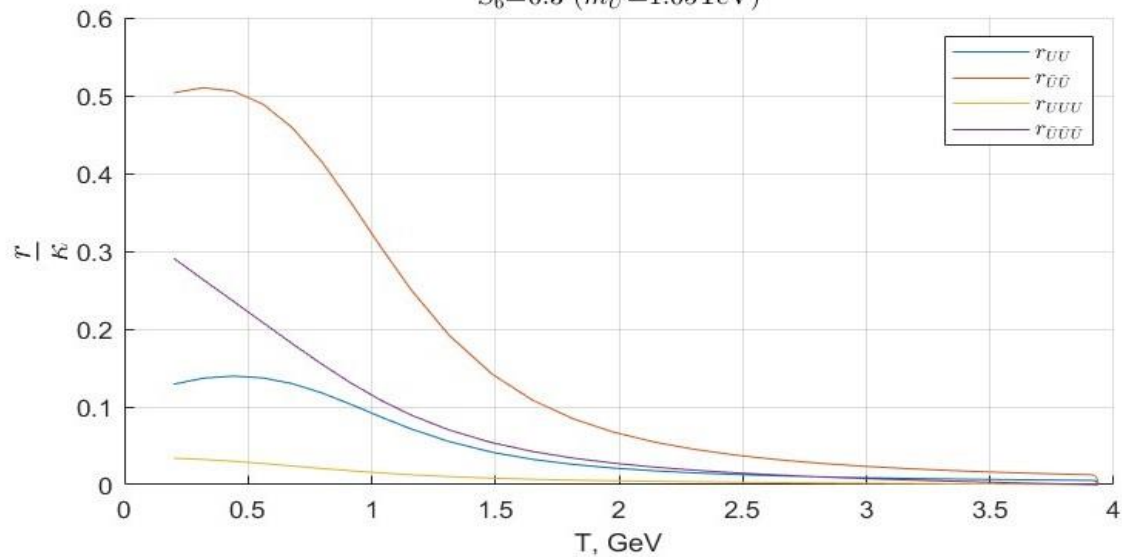
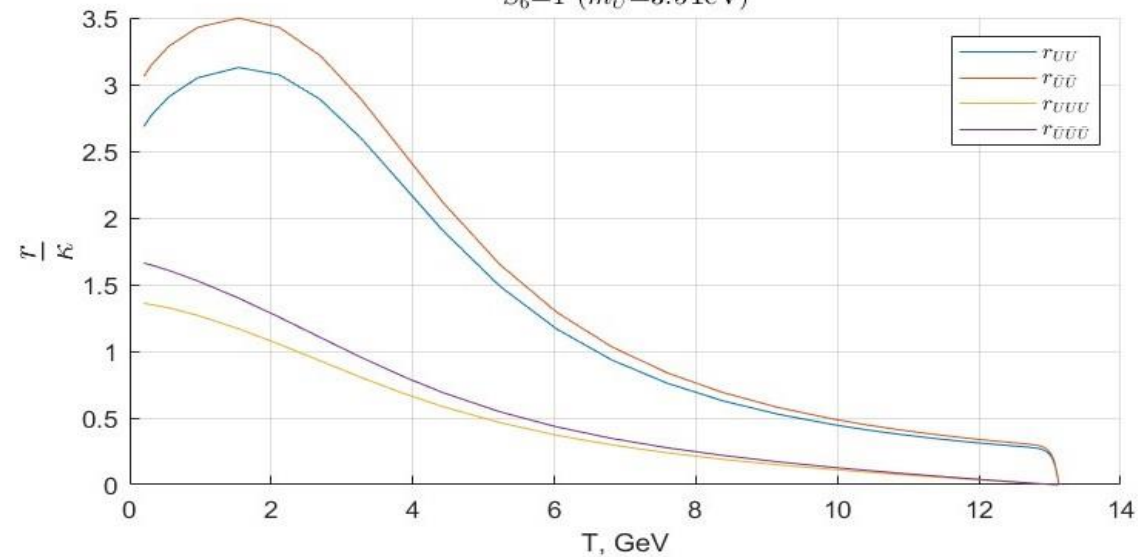
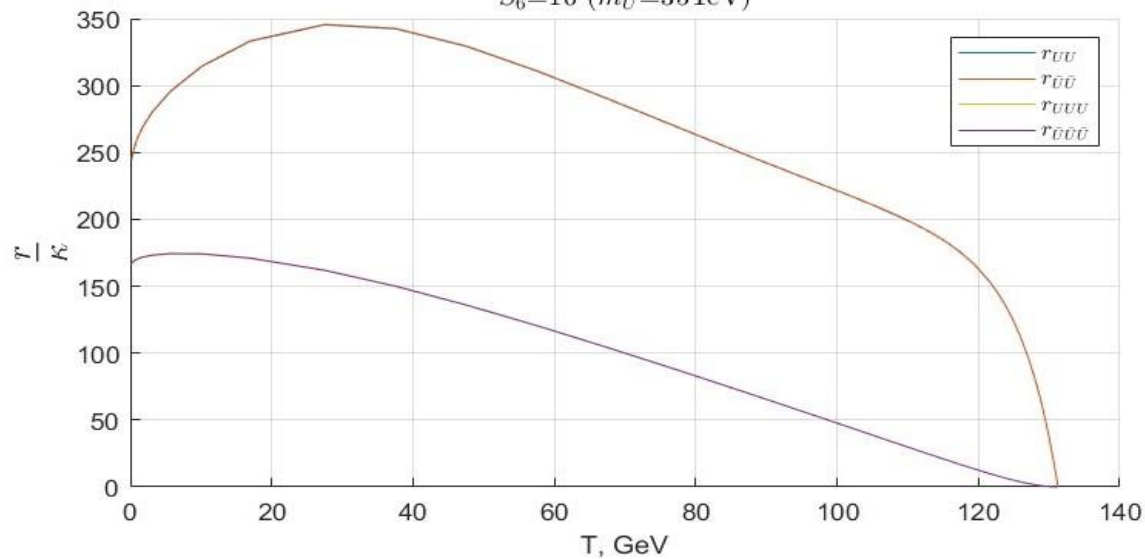
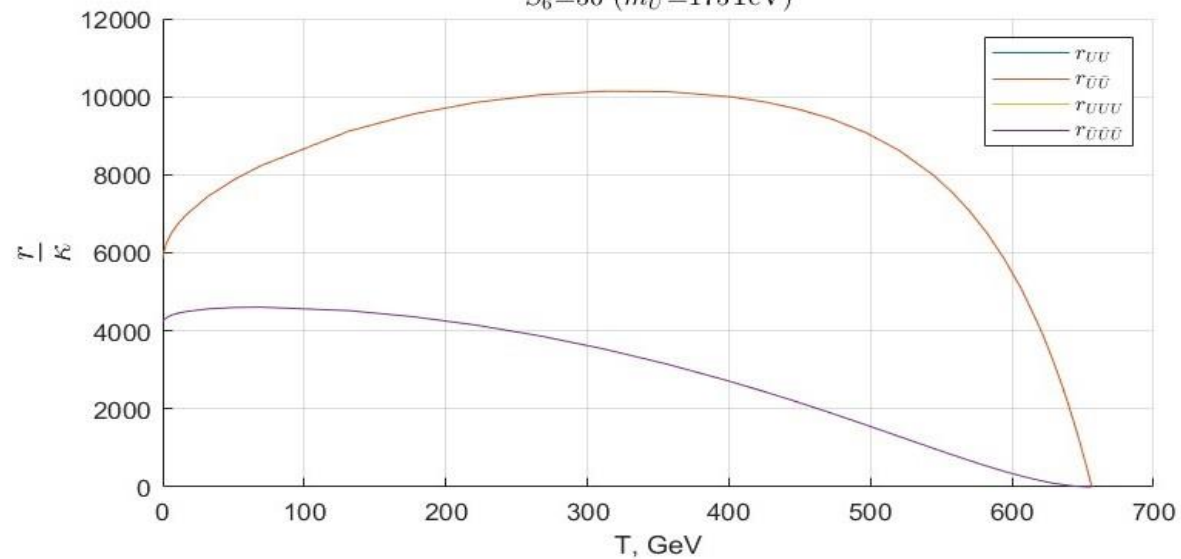
МИФИ

Национальный
исследовательский
ядерный университет

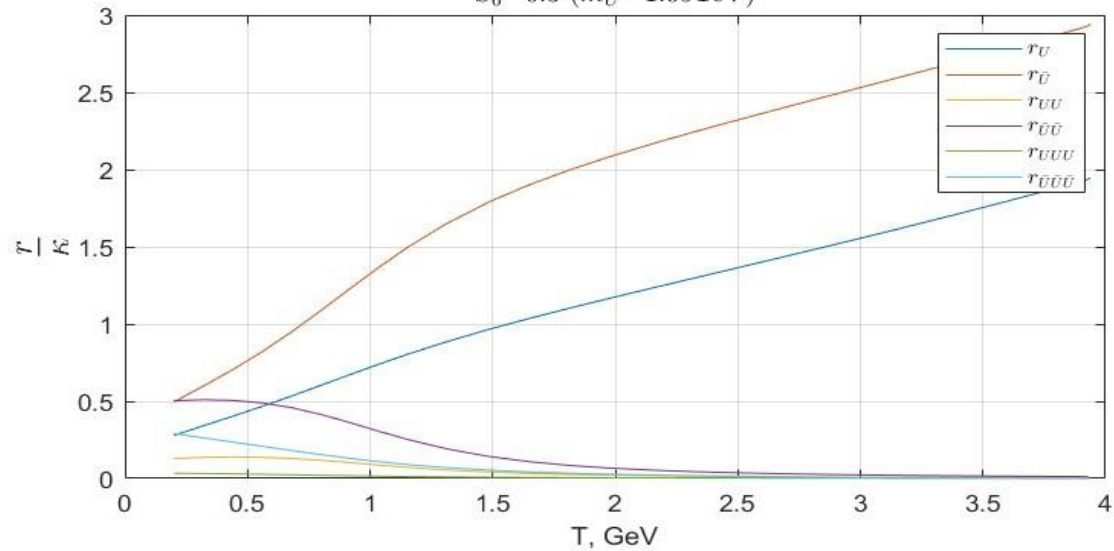
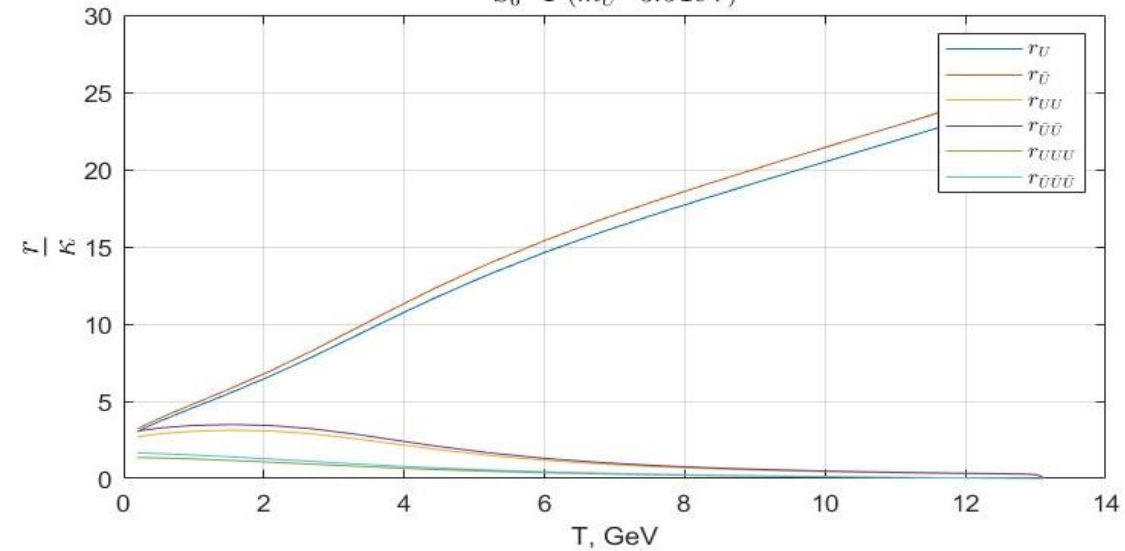
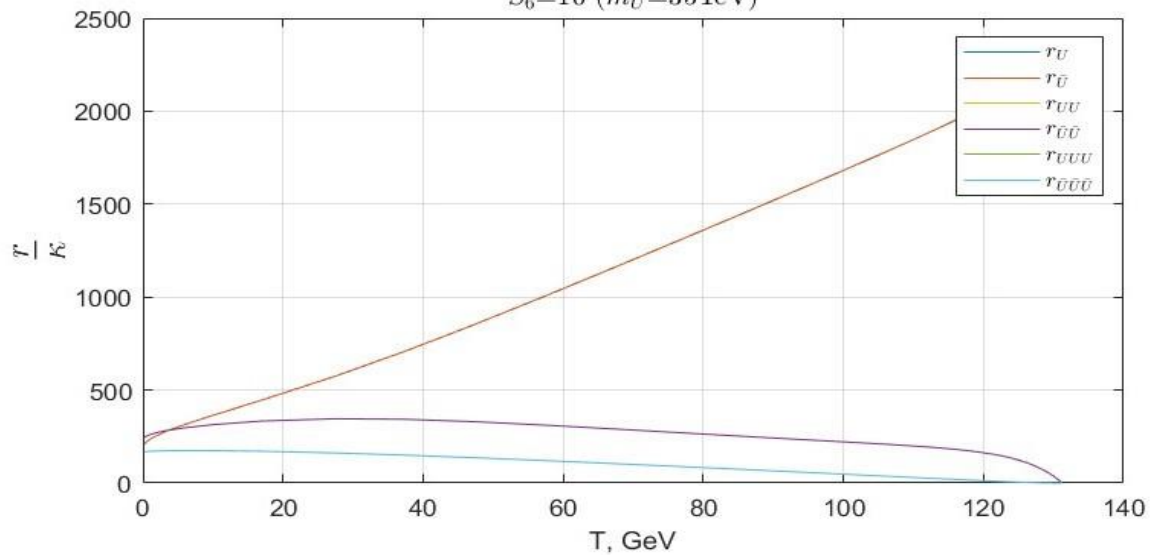
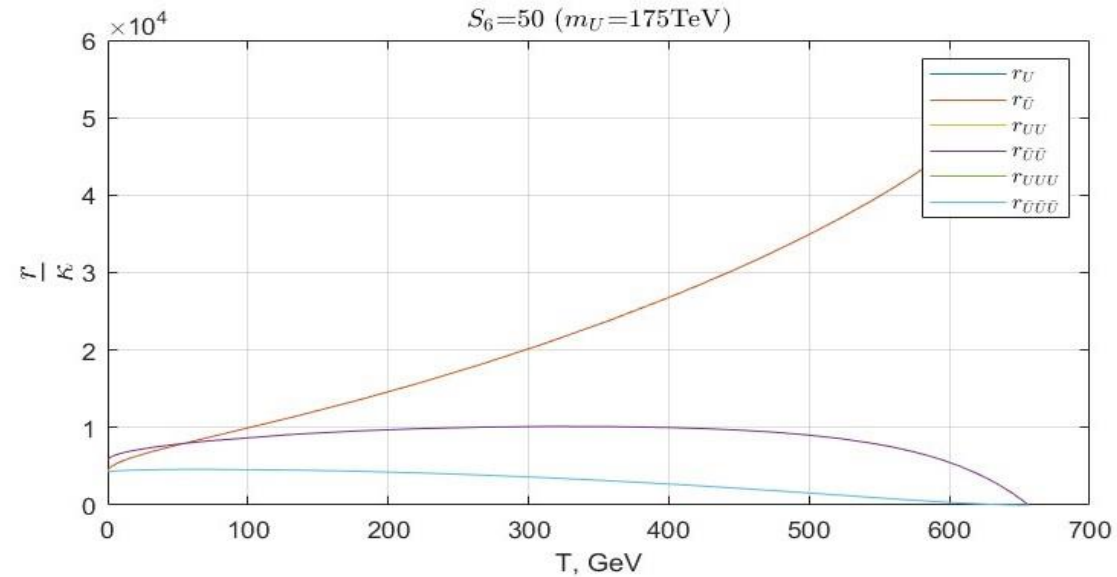
**Дополнительные
слайды**

$S_6=0.3$ ($m_U=1.05\text{TeV}$) $S_6=1$ ($m_U=3.5\text{TeV}$) $S_6=10$ ($m_U=35\text{TeV}$) $S_6=50$ ($m_U=175\text{TeV}$)Графики зависимости $\frac{r}{k}$ от T

$S_6=0.3$ ($m_U=1.05\text{TeV}$) $S_6=1$ ($m_U=3.5\text{TeV}$) $S_6=10$ ($m_U=35\text{TeV}$) $S_6=50$ ($m_U=175\text{TeV}$)Графики зависимости $\frac{r}{k}$ от T

$S_6=0.3$ ($m_U=1.05\text{TeV}$) $S_6=1$ ($m_U=3.5\text{TeV}$) $S_6=10$ ($m_U=35\text{TeV}$) $S_6=50$ ($m_U=175\text{TeV}$)

Графики зависимости $\frac{r}{k}$ от T

$S_6=0.3$ ($m_U=1.05\text{TeV}$) $S_6=1$ ($m_U=3.5\text{TeV}$) $S_6=10$ ($m_U=35\text{TeV}$) $S_6=50$ ($m_U=175\text{TeV}$)

Графики зависимости $\frac{r}{k}$ от T