

НЕТОПОЛОГИЧЕСКИЕ СОЛИТОНЫ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ И ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВЫЕ СИГНАЛЫ

Либанов Александр Максимович

МГУ им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: д-р физ.-мат. наук Троицкий Сергей Вадимович

30 мая 2024 г.



Мотивация

- ▶ LIGO/VIRGO детектируют гравитационно-волновые сигналы;
- ▶ LIGO/VIRGO способны различать объекты только по массам;
- ▶ Некоторые объекты попадают в "mass-gap" для черных дыр (например, GW190814, GW200105 и GW200115);
- ▶ Варианты решения? Q-шары темной материи!

R. Abbott et al, The Astrophysical Journal Letters 896 (2020)

R. Abbott et al, The Astrophysical Journal Letters 915 (2021)



Постановка задачи

- ✓ Модель двух скалярных полей (теория Фридберга-Ли-Сирлина) (R. Friedberg, T. D. Lee, A. Sirlin, Phys. Rev. (1976)),

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \varphi)^2 - U(\varphi) + (\partial_\mu \chi)^* \partial_\mu \chi - h^2 \varphi^2 \chi^* \chi, \quad (1)$$

$$U(\varphi) = \lambda(\varphi^2 - v^2)^2.$$

- ✓ Космологические Q-шары рождаются в ходе фазового перехода I-го рода (V. Rubakov and D. Gorbunov, Introduction To The Theory Of The Early Universe: Hot Big Bang Theory.);
- ? Радиус и масса Q-шара;
- ? Оценка параметра v ;
- ? Модель взаимодействия свободных космологических Q-шаров;
- ? Модель взаимодействия космологических Q-шаров в галактиках



Постановка задачи

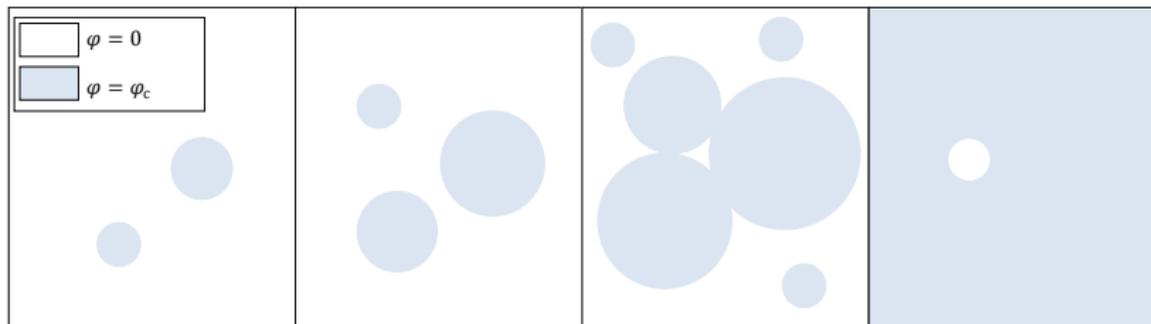


Рис.: Схематичное изображение фазового перехода I-го рода в ранней Вселенной. Белая область — область старой фазы ($\varphi = 0$), голубая область — область новой фазы ($\varphi = \varphi_c$). Как видно из рисунка, в некоторый момент времени в выделенном объеме останется одна область старой фазы, которая, для простоты, в рамках данной работы будет считаться сферической.



E. Krylov, A. Levin and V. Rubakov, *Phys. Rev. D* 87 (2013).



Параметры Q-шаров: масса и радиус

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \varphi)^2 - U(\varphi) + (\partial_\mu \chi)^* \partial_\mu \chi - h^2 \varphi^2 \chi^* \chi.$$

U(1)-симметрия: $\chi \rightarrow e^{i\alpha} \chi \Rightarrow$ существует сохраняющийся заряд

$$E(R) = \frac{\pi Q}{R} + \frac{4\pi}{3} R^3 U_0, \quad (2)$$

$$R_Q = \left(\frac{Q}{4U_0} \right)^{1/4}, \quad (3)$$

$$m_Q = \frac{4\sqrt{2}\pi}{3} U_0^{1/4} Q^{3/4}. \quad (4)$$

Рубаков, В.А., Классические калибровочные поля. УРСС, 1998



Параметры Q-шаров: заряд космологического Q-шара

Ограничение на заряд сверху.

$$\frac{n_\chi - n_{\bar{\chi}}}{s} = \frac{n_Q Q}{s} = \eta_\chi, \quad (5)$$

$$V_\star = \xi \left(\frac{u A^{1/2} M_{pl}^*}{T_c^2 L^{3/2}} \right)^3, \quad (6)$$

$$Q_\star = \eta_\chi \xi \frac{2\pi^2 g_\star}{45} \left(\frac{u A^{1/2} M_{pl}^*}{L^{3/2} T_c} \right)^3. \quad (7)$$

Таким образом, заряд космологического Q-шара лежит в пределах:

$$Q_{min} < Q < Q_\star.$$

E. Krylov, A. Levin and V. Rubakov, Phys. Rev. D 87 (2013)



Оценка параметра потенциала

Сечение взаимодействия сгустков темной материи:

$$\langle \bar{\sigma} \rangle_b = \bar{\sigma}_* \int_0^1 \frac{x^{-1/4} x^{3/4} (1-x)}{x^{3/4} (1-x)} dx \approx 1.3 \bar{\sigma}_* \lesssim 1 \text{ см}^2/\text{г}, \quad (9)$$

где $x = Q/Q_*$, $\bar{\sigma}_* = \bar{\sigma}(Q_*)$. Найдём сечение $\bar{\sigma}(Q)$,

$$\bar{\sigma}(Q) = \frac{\pi R_Q^2}{m_Q} = \frac{3}{8\sqrt{2}} v^{-3} Q^{-1/4}, \quad (10)$$

$$U_0 = v^4, \quad m_\chi = kv, \quad k = h/\lambda^{1/4}.$$

Тогда из (9) с учетом (10) и (7) получаем нижний предел для v ,

$$v_{min} \gtrsim \frac{1.07 \cdot 10^{-7} u^{2/3}}{\eta_\chi^{1/9}} \text{ ГэВ}. \quad (11)$$

T. Multamaki and I. Vilja, Phys. Lett. B 484 (2000)

T. Multamaki and I. Vilja, Phys. Lett. B 482 (2000)



Оценка параметра потенциала

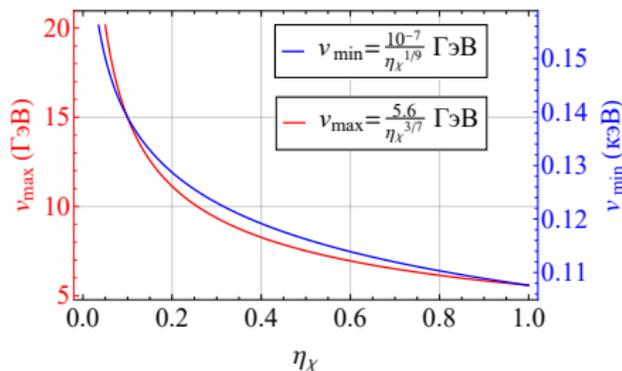


Рис.: Космологические ограничения на v от η_{χ} в случае скорости космологических Q-шаров $u = 1$.

$$\rho = \int_0^{Q_*} m_Q dn(Q) \sim Q^{25/12}, \quad (12)$$

$$\rho_{DM} \gtrsim \frac{4\sqrt{2}\pi}{3} v \cdot Q_*^{-1/4} \eta_{\chi} s_0, \quad (13)$$

$$v_{\max} \lesssim \frac{5.57 \cdot u^{3/7}}{\eta_{\chi}^{3/7}} \text{ ГэВ}. \quad (14)$$



Слияние Q-шаров: расширяющаяся Вселенная

После фазового перехода плоская расширяющаяся Вселенная заполнена "газом" космологических Q-шаров, которые начинают взаимодействовать с выделенным Q-шаром.

$$10^{19} \text{ ГэВ} \gtrsim v \sim T_c \gtrsim 2.3 \times 10^{-13} \text{ ГэВ} \approx 2.7 \text{ К}, \quad (15)$$

$$\begin{cases} \dot{Q} = u Q_* \sigma(Q) n_*, \\ Q(t_c) = Q_*, \end{cases} \quad (16)$$

$$n_* = \frac{1}{V_* a^3(t)}, \quad (17)$$

$$\sigma = \frac{\pi R_Q^2(t)}{2}. \quad (18)$$

В любой физически осмысленной конфигурации свободных параметров v , u , T_c и η_χ решение (16) почти не зависит от времени и, следовательно, невозможно получить Q-шар звездной массы.



Слияние Q-шаров: взаимодействие в галактиках

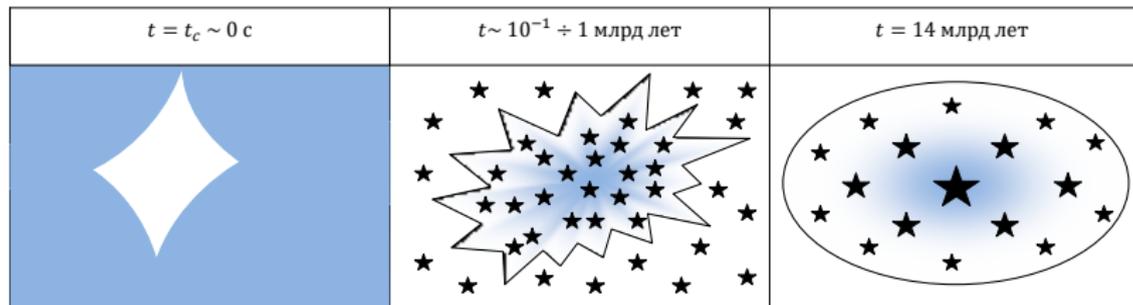


Рис.: Схематичное изображение модели слияния космологических Q-шаров с выделенным Q-шаром. При $t = t_c \sim 0$ с изображен фазовый переход I-го рода. В момент времени $t \sim 100$ млн лет – 1 млрд лет начали образовываться первые галактики (Bromm Volker, Yoshida Naoki. [Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2011](#)) и космологические Q-шары попадают в гравитационный потенциал протогалактики, в котором начинается поглощение выделенным Q-шаром космологических Q-шаров. В момент времени $t = 14$ млрд лет выделенный Q-шар приобретает массу порядка 1 массы Солнца.



Слияние Q-шаров: взаимодействие в галактиках

Космологические Q-шары гравитационно-связаны потенциалом галактики. Скорость Q-шаров в галактике – характерная орбитальная скорость звезд. Плотность Q-шаров определяется профилем Наварро-Френка-Уайта.

$$10^{19} \text{ ГэВ} \gtrsim v \sim T_c \gtrsim 5 \times 10^{-12} \text{ ГэВ} \approx 60 \text{ К}, \quad (19)$$

$$\begin{cases} \dot{Q} = Q_* \sigma(Q) u_* n, & t \in [0; 13] \text{ млрд лет,} \\ Q(0) = Q_*. \end{cases} \quad (20)$$

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{\frac{r}{R_s} \left(1 + \frac{r}{R_s}\right)^2}, \quad (21)$$

$$n(r) = \frac{\rho(r)}{m_*}.$$



Результаты

Решение уравнения (20) в терминах массы итогового Q-шара:

$$m_Q(v, u, \eta_\chi, u, u_*, T_c, r) = \frac{\sqrt{3}\pi^{5/2}}{32 \cdot 2^{3/4}} v^{-7/2} Q_*^{3/4} u_*^{3/2} \rho^{3/2} (t + \sqrt{Q_*})^{3/2} \gtrsim 1 M_\odot. \quad (23)$$

Подходящие свободные параметры:

$$\begin{cases} v \approx 7.5 \times 10^{-9} \text{ ГэВ}, \\ u = 1, \\ \eta_\chi = 1, \\ u_* = 0.0007, \\ T_c \approx 1.5 \times 10^{-11} \text{ ГэВ}. \end{cases} \quad (24)$$

$$\langle \bar{\sigma} \rangle_b \approx 3 \text{ см}^2/\text{г} \sim 1 \text{ см}^2/\text{г}.$$



Результаты

Число Q-шаров звездной массы не должно превышать число нейтронных звезд.

$$N_Q^{stellar} = \int_0^{0.05 \text{ кпк}} \frac{4\pi r^2 \rho(r)}{m_Q(r)} dr \approx 4 \times 10^6 < N_{NS} \sim 10^8, \quad (26)$$

$$N_Q^{total} = \int_0^{19 \text{ кпк}} \frac{4\pi r^2 \rho(r)}{m_Q(r)} dr + \int_{19 \text{ кпк}}^{200 \text{ кпк}} \frac{4\pi r^2 \rho(r)}{m_*} dr \sim 10^{17}. \quad (27)$$

Таким образом, массы всех Q-шаров лежат в пределах:

$$m_* \approx 4 \times 10^{-6} M_\odot \leq m_Q(r) \lesssim 4M_\odot. \quad (28)$$



Результаты

Радиус выделенного Q-шара с массой $4M_{\odot}$:

$$R_Q = \sqrt{2}vQ^{1/4}(r = 0.02 \text{ кпк}) \sim 10^{10} \text{ км.} \quad (29)$$

Радиус космологического Q-шара:

$$R_Q = \sqrt{2}vQ_*^{1/4} \approx 8 \times 10^8 \text{ км.} \quad (30)$$



Результаты

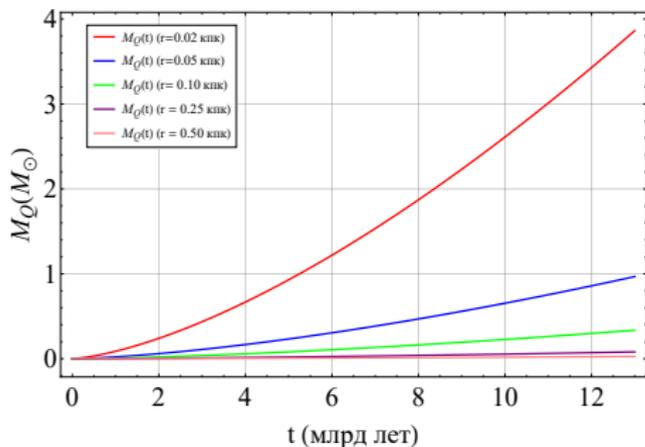


Рис.: Эволюция массы выделенного Q-шара на разном удалении от центра галактики.

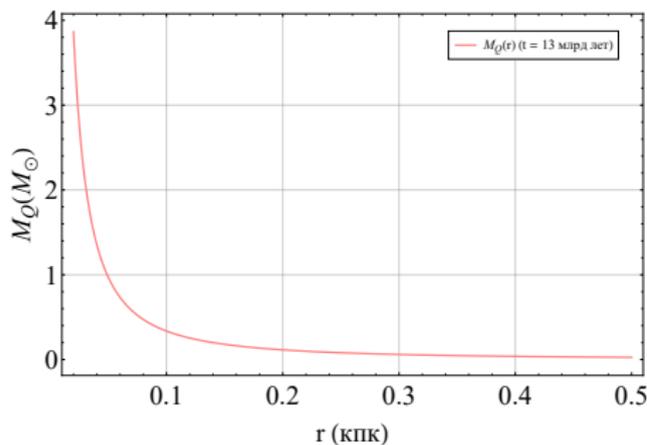


Рис.: Современная масса выделенного Q-шара как функция расстояния от центра галактики.



Результаты

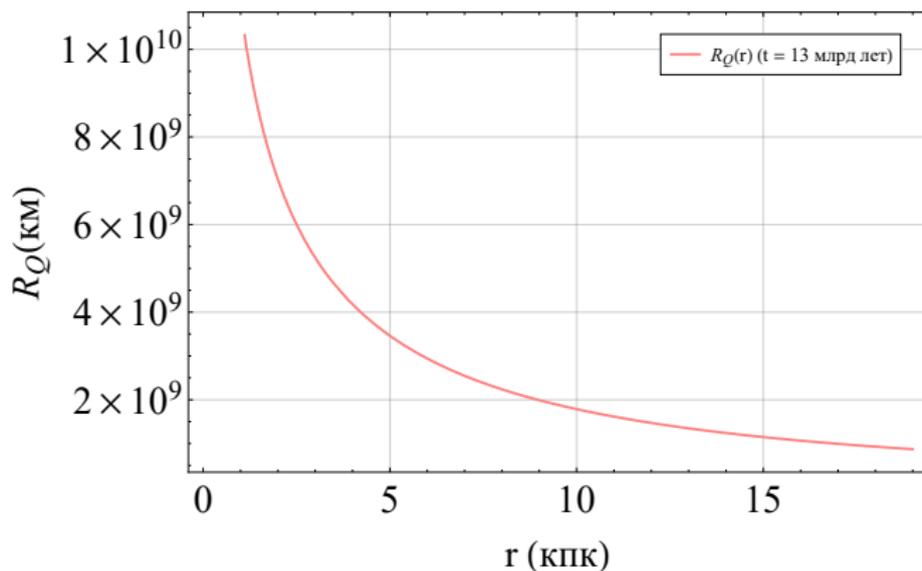


Рис.: Радиус выделенного Q-шара R_Q как функция расстояния от центра галактики r .



Результаты

Таблица: Основные параметры выделенных Q-шаров в современный момент времени.

$v \approx 7.5 \times 10^{-9}$ ГэВ, $T_c \approx 1.5 \times 10^{-11}$ ГэВ, $\eta_\chi = 1$, $u = 1$, $u_* = 0.0007$, $m_* \approx 4 \times 10^{-6} M_\odot$						
r (кпк)	0.02	0.05	1	10	19	200
M_Q (M_\odot)	4	1	0.008	3×10^{-5}	4×10^{-6}	4×10^{-6}
R_Q (км)	8.6×10^{10}	5.5×10^{10}	1×10^{10}	1.8×10^9	8.8×10^8	8.8×10^8



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

