

ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВЫЕ СИГНАЛЫ ОТ СЛИЯНИЯ ЭКЗОТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ЗВЁЗДНЫХ МАСС

Либанов Александр Максимович

МГУ им. М.В. Ломоносова

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

30 мая 2022 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) [1], [2];
- ▶ Варианты решения? Q-шары темной материи!



Постановка задачи

- ✓ Модель двух скалярных полей (теория Фридберга-Ли-Сирлина)[3],

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

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

- ✓ Космологические Q-шары рождаются в ходе фазового перехода I-го рода[4];
- ? Радиус и масса Q-шара;
- ? Распределение Q-шаров по зарядам;
- ? Оценка параметра v ;
- ? Модель взаимодействия космологических Q-шаров.



Постановка задачи

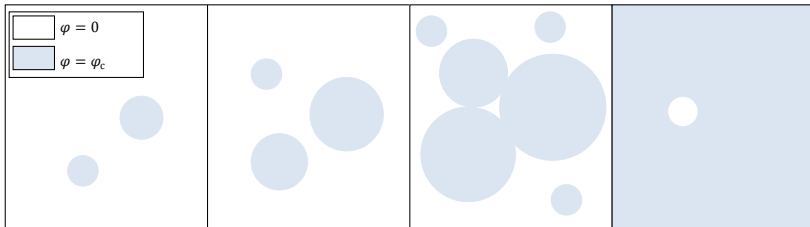


Рис.: Схематичное изображение фазового перехода I-го рода в ранней Вселенной. Белая область — область старой фазы ($\varphi = 0$), голубая область — область новой фазы ($\varphi = \varphi_c$) [5]. Как видно из рисунка, в некоторый момент времени в выделенном объеме останется одна область старой фазы, которая, для простоты, в рамках данной работы будет считаться сферической.



Основные результаты и их обсуждение

Уточнен результат статьи [6].

$$F = 1 - \left(\frac{Q}{Q_*} \right)^{4/3} = \int \frac{dP}{dQ} dQ. \quad (2)$$

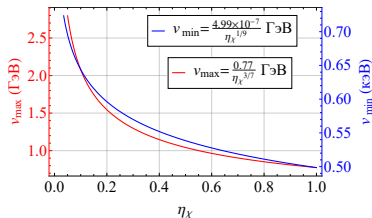


Рис.: Космологические ограничения на v от η_χ в случае скорости космологических Q -шаров $u = 0.01$.

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

$$v_{max} \lesssim \frac{5.57 \cdot u^{3/7}}{\eta_\chi^{3/7}} \text{ ГэВ}. \quad (4)$$



Основные результаты и их обсуждение

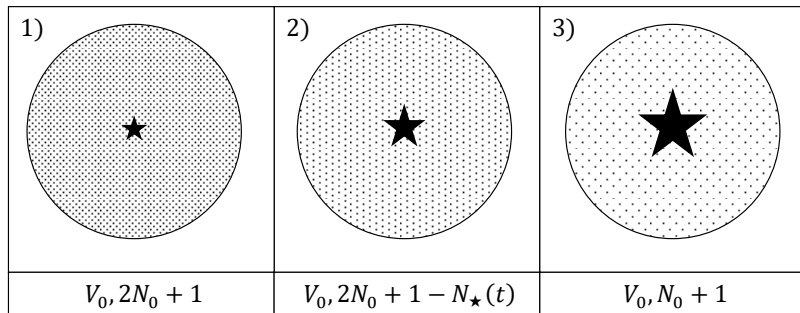


Рис.: Схема эволюции области V_0 . Звезда — выделенный космологический Q-шар, точки — остальные космологические Q-шары. Первый этап — момент времени сразу же после фазового перехода. Второй этап — момент времени t , выделенный космологический Q-шар начинает приобретать большую массу за счет поглощения окружающих космологических Q-шаров. Третий этап — выделенный космологический Q-шар приобретает массу порядка μM_\odot .



Основные результаты и их обсуждение

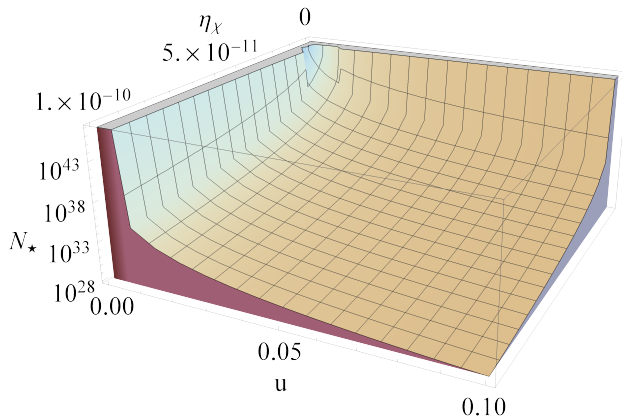


Рис.: Современное значение $N_*(v_{\max})$ как функции свободных параметров η_χ и скорости космологических Q-шаров u .



Основные результаты и их обсуждение

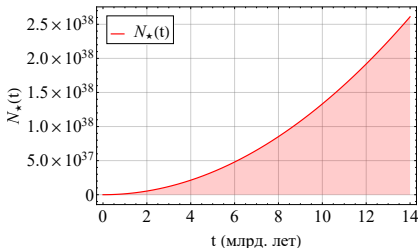


Рис.: $N_*(t)$ на масштабе времени жизни Вселенной в случае конфигурации свободных параметров $\eta_\chi \approx 0.9 \cdot 10^{-11}$ и $u = 0.03$.

$$M_Q^{max} \approx 5.75 \cdot 10^{19} \text{ кг} \approx 0.005 M_{\text{П}}, \quad (5)$$

$$R_Q^{max} \approx 9 \cdot 10^{-11} \text{ км}, \quad (6)$$

где $M_{\text{П}}$ — масса Плутона. Радиус Шварцшильда же для такой конфигурации параметров,

$$R_{\text{ВН}}^{max} \approx 8.62 \cdot 10^{-11} \text{ км}. \quad (7)$$



Параметры Q-шаров

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

U(1)-симметрия: $\chi \rightarrow e^{i\alpha} \chi \Rightarrow$ существует сохраняющийся заряд
[5],[7],[3]

$$E(R) = \frac{\pi Q}{R} + \frac{4\pi}{3} R^3 U_0, \quad (8)$$

$$R_Q = \left(\frac{Q}{4U_0} \right)^{1/4}, \quad (9)$$

$$m_Q = \frac{4\sqrt{2}\pi}{3} U_0^{1/4} Q^{3/4}, \quad (10)$$

$$Q_{min} = \frac{m_Q}{m_\chi}.$$



Параметры Q-шаров

Ограничение на заряд сверху.

$$\frac{n_\chi - n_{\bar{\chi}}}{s} = \frac{n_Q Q}{s} = \eta_\chi, \quad (12)$$

$$V_\star = \xi \left(\frac{u A^{1/2} M_{pl}^*}{T_c^2 L^{3/2}} \right)^3, \quad (13)$$

$$Q_\star = \eta_\chi \xi \frac{2\pi^2 g_*}{45} \left(\frac{u A^{1/2} M_{pl}^*}{L^{3/2} T_c} \right)^3. \quad (14)$$

Таким образом, заряд Q-шара лежит в пределах,

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



Распределение Q-шаров по зарядам

Найдем вероятность рождения Q-шара с зарядом больше некоторого \bar{Q} .

Вероятность появления пузыря новой фазы в пузыре старой фазы объема V ,

$$F_b = V\Gamma \frac{R}{u}. \quad (16)$$

Вероятность рождения Q-шара с зарядом больше \bar{Q} ,

$$F = 1 - F_b \Rightarrow R_\star^3 \Gamma \frac{R_\star}{u} \sim 1 \Rightarrow \quad (17)$$

$$F = 1 - \frac{V\Gamma R/u}{V_\star \Gamma R_\star/u}. \quad (18)$$



Распределение Q-шаров по зарядам

Будем считать, что частицы χ распределены по Вселенной равномерно, тогда $Q \sim V$, и, следовательно, (18) примет вид,

$$F = 1 - \left(\frac{Q}{Q_*} \right)^{4/3} = \int \frac{dP}{dQ} dQ, \quad (19)$$

$$\frac{dP}{dQ} = - \frac{F(\bar{Q} + dQ) - F\bar{Q}}{dQ} = - \frac{dF}{dQ}, \quad (20)$$
$$\Rightarrow$$

$$n(Q) \sim A \int_{Q_{min}}^{Q_*} \frac{dP}{dQ} dQ \sim A \left(\frac{Q}{Q_*} \right)^{4/3}, \quad (21)$$

$$A = \frac{7}{4}.$$



Оценка параметра потенциала

Сечение взаимодействия сгустков темной материи [8], [9].

$$\langle \bar{\sigma} \rangle_b = \bar{\sigma}_* \int_0^1 \frac{x^{-1/4} x^{3/4} (1-x)}{x^{3/4} (1-x)} dx \approx 1.3 \bar{\sigma}_* \lesssim 1 \text{ см}^2/\text{г}, \quad (22)$$

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

$$\bar{\sigma}(Q) = \frac{\pi R_Q^2}{m_Q} = \frac{3}{8\sqrt{2}} v^{-3} Q^{-1/4}, \quad (23)$$

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

Тогда из (22) с учетом (23) и (14) получаем нижний предел для v ,

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



Оценка параметра потенциала

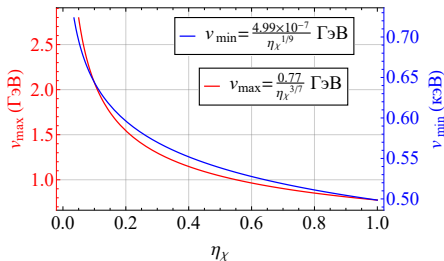


Рис.: Космологические ограничения на v от η_χ в случае скорости космологических Q-шаров $u = 0.01$.

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

$$\rho_{DM} \gtrsim \frac{4\sqrt{2}\pi}{3} v \cdot Q_*^{-1/4} \eta_\chi s_0, \quad (26)$$

$$v_{\max} \lesssim \frac{5.57 \cdot u^{3/7}}{\eta_\chi^{3/7}} \text{ ГэВ}. \quad (27)$$



Слияние Q-шаров

$$\begin{cases} \dot{Q} = \dot{N}_* Q_* = \frac{\pi u}{2v^2} \left(\frac{(1+N_*)Q_*}{4} \right)^{1/2} \cdot \frac{2N_0+1-N_*}{(2N_0+1)V_*}, \\ t > 0, \\ N_*(0) = 0. \end{cases} \quad (28)$$

$$N_*(t) = -1 + (\theta + 1) \cdot \left[\tanh \left(\frac{\sqrt{\theta + 1} \cdot \text{const} + \sqrt{\theta + 1} \cdot t}{2\zeta} \right) \right]^2. \quad (29)$$

$$\zeta = \frac{4u\theta v^2 V_* Q_*^{1/2}}{\pi},$$

$$\theta = 2N_0 + 1,$$

$$\text{const} = \pm \frac{2\zeta \tanh^{-1} \left(\sqrt{\frac{1}{1+\theta}} \right)}{\sqrt{1+\theta}}.$$



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



- [1] R. Abbott et al, *GW190814: Gravitational waves from the coalescence of a 23 solar mass black hole with a 2.6 solar mass compact object*, *The Astrophysical Journal Letters* **896** (2020) L44.
- [2] R. Abbott et al, *Observation of gravitational waves from two neutron star–black hole coalescences*, *The Astrophysical Journal Letters* **915** (2021) L5.
- [3] R. Friedberg, T. D. Lee and A. Sirlin, *Class of scalar-field soliton solutions in three space dimensions*, *Phys. Rev. D* **13** (1976) 2739.
- [4] V. Rubakov and D. Gorbunov, *Introduction To The Theory Of The Early Universe: Hot Big Bang Theory*. World Scientific Publishing Company, 2011.
- [5] E. Krylov, A. Levin and V. Rubakov, *Cosmological phase transition, baryon asymmetry and dark matter Q-balls*, *Phys. Rev. D* **87** (2013) 083528 [1301.0354].
- [6] S. Troitsky, *Supermassive dark-matter Q-balls in galactic centers?*, *JCAP* **11** (2016) 027 [1510.07132].



- [7] Рубаков, В.А., *Классические калибровочные поля*. УРСС, 1999.
- [8] T. Multamaki and I. Vilja, *Q ball collisions in the MSSM: Gauge mediated supersymmetry breaking*, *Phys. Lett. B* **484** (2000) 283 [hep-ph/0005162].
- [9] T. Multamaki and I. Vilja, *Q Ball collisions in the MSSM: Gravity mediated supersymmetry breaking*, *Phys. Lett. B* **482** (2000) 161 [hep-ph/0003270].

