НЕТОПОЛОГИЧЕСКИЕ СОЛИТОНЫ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ И ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВЫЕ СИГНАЛЫ

arXiv:2412.08803

Александр Либанов

INR
Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвященная 70-летию со дня рождения академика РАН Валерия Анатольевича Рубакова
Москва, 21 февраля 2025

Мотивация

Существует несколько необычных гравитационно-волновых событий, полученных от слияния объектов звездной массы, например:

- GW190814: $20M_\odot$ и $2.5M_\odot$;
- GW200105: $9M_\odot$ и $2M_\odot$;
- GW200115: $6M_\odot$ и $1.5M_\odot$.

Масса одного из объектов в таких событиях лежит в разрыве масс (mass-gap) для черных дыр. Возможное объяснение – **Q-шары темной материи**?

R. Abbott et al, AJL (2021)

Модель: лагранжиан

Лагранжиан Фридберга-Ли-Сирлина:

$$\mathscr{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \varphi)^2 - U(\varphi) + (\partial_\mu \chi)^* \partial_\mu \chi - k^2 \varphi^2 \chi^* \chi, \tag{1}$$

$$U(\varphi) = (\varphi^2 - v^2)^2,$$

Параметры Q-шаров:

$$R_Q = \left(\frac{Q}{4}\right)^{1/4} \frac{1}{v}. \tag{2}$$

$$m_Q = \frac{4\sqrt{2}\pi}{3} v Q^{3/4}, \tag{3}$$

$$Q_{min} = \frac{m_Q}{m_\chi} \tag{4}$$

Friedberg R., Lee T. D., Sirlin A., Phys. Rev. D (1976)

Модель: фазовый переход первого рода

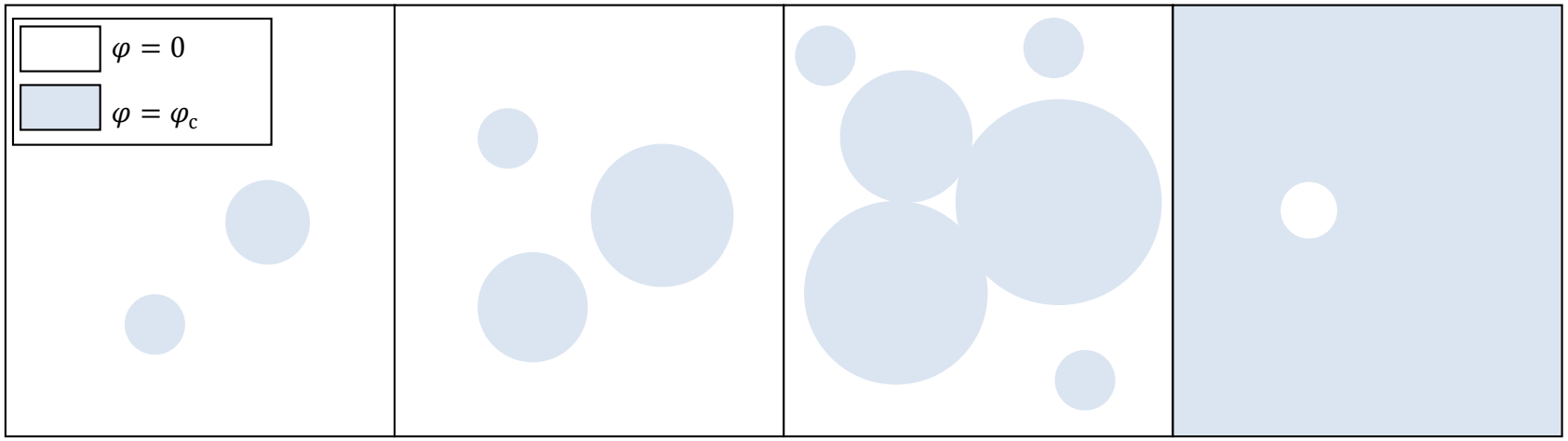

Рис.: Схематичное изображение фазового перехода I-го рода в ранней Вселенной. Белая область – область старой фазы ($\varphi = 0$), голубая область – область новой фазы ($\varphi = \varphi_c$). В некоторый момент времени остается один пузырек старой фазы в некотором объеме, который, для простоты, будем считать сферическим. Q-шар, рожденный из этой области, будем называть **космологическим**, а его параметры будем обозначать индексом "$\star$".

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

Параметры космологических Q-шаров

$$\frac{n_\chi - n_{\bar{\chi}}}{s} = \frac{n_Q Q}{s} = \eta_\chi \text{ – асимметрия частиц поля } \chi, \tag{5}$$

$$V_\star = \xi \left(\frac{u A^{1/2} M_{pl}^*}{T_c^2 L^{3/2}} \right)^3 \text{ – объем, из которого рождается космологический Q-шар,} \tag{6}$$

$$Q_\star = \eta_\chi \xi \frac{2\pi^2 g_*}{45} \left(\frac{u A^{1/2} M_{pl}^*}{L^{3/2} T_c} \right)^3 \text{ – макс. заряд космологического Q-шара.} \tag{7}$$

Заряд космологического Q-шара лежит в пределах

$$Q_{min} < Q < Q_\star. \tag{8}$$

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

Распределение космологических Q-шаров по зарядам

Найдем вероятность рождения космологического Q-шара с зарядом, большим некоторого $\bar{Q}$.
Вероятность рождения пузырька новой фазы в пузырьке старой V:

$$F_b = V\Gamma\frac{R}{u}. \tag{9}$$

Тогда, вероятность рождения космологического Q-шара с зарядом, большим $\bar{Q}$:

$$F = 1 - F_b \Rightarrow R_\star^3\Gamma\frac{R_\star}{u} \sim 1 \Rightarrow \tag{10}$$

$$F = 1 - \frac{V\Gamma R/u}{V_\star\Gamma R_\star/u}. \tag{11}$$

A. Guth, E. Weindberg, Phys. Rev. D (1981)

Распределение космологических Q-шаров по зарядам

Будем считать, что χ-частицы равномерно распределены по Вселенной, тогда $Q \sim V$, и, соответственно, (11) примет вид:

$$F = 1 - \left(\frac{Q}{Q_\star}\right)^{4/3} = \int \frac{dP}{dQ} dQ, \tag{12}$$

$$\frac{dP}{dQ} = -\frac{F(\bar{Q} + dQ) - F\bar{Q}}{dQ} = -\frac{dF}{dQ}, \tag{13}$$

$$\Rightarrow$$

$$n(Q) \sim A \int_{Q_{min}}^{Q_\star} \frac{dP}{dQ} dQ \sim A\left(\frac{Q}{Q_\star}\right)^{4/3}, \tag{14}$$

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

S. Troitsky, JCAP (2016)

Оценка параметра потенциала

Приведенное сечение сгустков темной материи:

$$\langle\bar{\sigma}\rangle_b = \bar{\sigma}_\star \int_0^1 \frac{x^{-1/4}x^{3/4}(1-x)}{x^{3/4}(1-x)}dx \approx 1.3\bar{\sigma}_\star \lesssim 1\ \mathrm{cm}^2/\mathrm{g}, \qquad (15)$$

где $x = Q/Q_\star$, $\bar{\sigma}_\star = \bar{\sigma}(Q_\star)$. Найдем приведенное сечение Q-шара $\bar{\sigma}(Q)$:

$$\bar{\sigma}(Q) = \frac{\pi R_Q^2}{m_Q} = \frac{3}{8\sqrt{2}}v^{-3}Q^{-1/4}, \qquad (16)$$

Тогда из (15) с учетом (16) и (7) можно получить нижнее ограничение v:

$$v_{min} \gtrsim \frac{10^{-7}u^{2/3}}{\eta_\chi^{1/9}}\ \mathrm{GeV}. \qquad (17)$$

M.Rocha et al, MNRAS (2013)

Оценка параметра потенциала

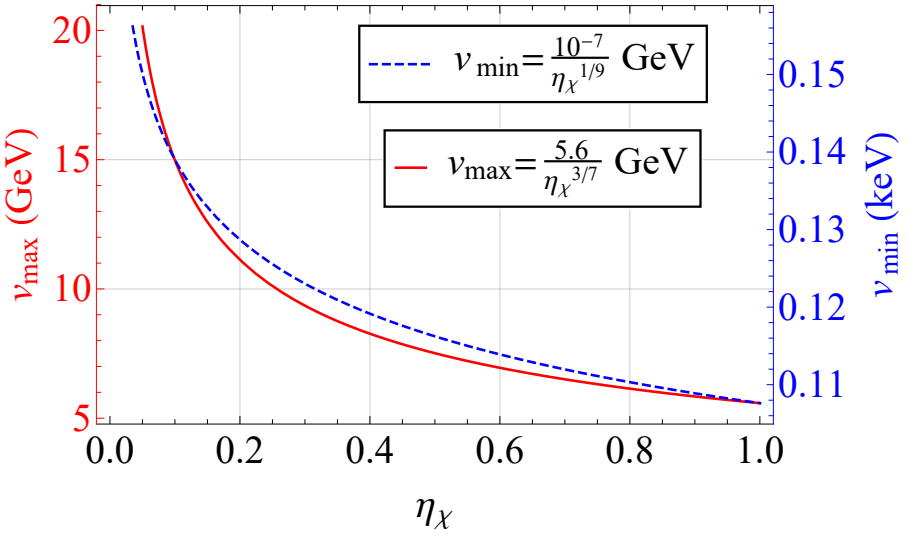

Рис.: Космологические ограничения на v как функция η_χ в случае $u = 1$.

$$\rho = \int_0^{Q_\star} m_Q dn(Q) \sim Q^{25/12}, \quad (18)$$

$$\rho_{DM} \gtrsim \frac{4\sqrt{2}\pi}{3} v \cdot Q_\star^{-1/4} \eta_\chi s_0, \quad (19)$$

$$v_{max} \lesssim \frac{6 \cdot u^{3/7}}{\eta_\chi^{3/7}} \text{ GeV}. \quad (20)$$

Слияние Q-шаров: плоская расширяющаяся Вселенная

Рассмотрим изменение заряда одного **выделенного** Q-шара в единицу времени из-за слияния с космологическими Q-шарами:

$$\begin{cases} \dot{Q} = Q_\star \sigma(Q) u \frac{1}{V_\star a^3(t)}, \\ Q(t_c) = Q_\star, \end{cases} \tag{21}$$

где t_c эпоха фазового перехода, связанная с v. Решение (21):

$$Q(t) = \left(-\frac{\pi Q_\star u \sqrt{\Omega_\Lambda}}{12 v^2 V_\star a_0^3 \Omega_M H_0} \coth\left[\frac{3}{2}\sqrt{\Omega_\Lambda} H_0 t\right] + C \right)^2, \tag{22}$$

с масштабным фактором

$$a = a_0 \left(\frac{\Omega_M}{\Omega_\Lambda}\right)^{1/3} (\sinh[\frac{3}{2}\sqrt{\Omega_\Lambda} H_0 t])^{2/3}, \tag{23}$$

и константой интегрирования

$$C = \frac{\pi Q_\star u \sqrt{\Omega_\Lambda}}{12 v^2 V_\star a_0^3 \Omega_M H_0} \coth\left[\frac{3}{2}\sqrt{\Omega_\Lambda} H_0 t_c\right] + \sqrt{Q_\star}. \tag{24}$$

В такой модели Q-шары почти не взаимодействуют.

Слияние Q-шаров: галактики

Так как Q-шары почти не взаимодействуют из-за масштабного фактора a, можно попробовать его "выключить". Это можно сделать, поместив космологические Q-шары в гравитационно-связанные структуры, например, в галактики. Сделаем некоторые предположения:

- космологические Q-шары участвуют в образовании галактик и распределены в них по известным профилям темной материи;
- Млечный Путь будем считать "типичной" галактикой;
- галактики почти не эволюционируют;
- вся темная материя представлена Q-шарами;
- Q-шары не взаимодействуют с обычной материей.

В таком случае локально можно "выключить" расширение Вселенной.

Слияние Q-шаров: галактики

Найдем концентрацию Q-шаров. В качестве профиля темной материи будет использоваться профиль Буркерта:

$$\rho(r) = \frac{\rho_b}{\left(1+\frac{r}{R_s}\right)\left(1+\frac{r^2}{R_s^2}\right)} \Rightarrow n(r) = \frac{\rho(r)}{m_Q(Q)}. \tag{25}$$

Рассмотрим взаимодействие выделенного Q-шара с другими Q-шарами разных зарядов:

$$\begin{cases} \dot{Q} = \sum\limits_k kQ_\star u_\star \sigma(kQ_\star) n(kQ_\star), \ t \in [0;13] \text{ Gyr}, \ k \in \mathbb{N}, \\ Q(0) = Q_\star, \end{cases} \tag{26}$$

где k-ый член:

$$\dot{Q} \sim (kQ_\star)^{3/4}. \tag{27}$$

A. Burkert, The Astrophysical Journal (1995)

S. Lin et al, A&A (2025)

Слияние Q-шаров: галактики

Упрощенное уравнение, которое следует из вида k-го члена в (26):

$$\begin{cases} \dot{Q} = Q u_\star \sigma(Q) n(Q), \ t \in [0; 13] \text{ Gyr}, \\ Q(0) = Q_\star. \end{cases} \tag{28}$$

Решение (28):

$$Q(t, r) = \left(\frac{3 u_\star \rho(r)}{64\sqrt{2} v^3} t + Q_\star^{1/4} \right)^4. \tag{29}$$

Масса Q-шара как функция времени с учетом (29):

$$m_Q(v, u, \eta_\chi, u_\star, T_c, r, t) = \frac{4\sqrt{2}\pi}{3} v \left(\frac{3 u_\star \rho(r)}{64\sqrt{2} v^3} t + Q_\star^{1/4} \right)^3. \tag{30}$$

Радиус Q-шара как функция времени с учетом (29):

$$R_Q(v, u, \eta_\chi, u_\star, T_c, r, t) = \frac{1}{\sqrt{2} v} \left(\frac{3 u_\star \rho(r)}{64\sqrt{2} v^3} t + Q_\star^{1/4} \right). \tag{31}$$

Анализ решения

Чтобы объяснить г.в.-события из mass-gap'а в первом приближении необходимо:

$$m_Q(v, u, \eta_\chi, u_\star, T_c, r)\Big|_{t=13\ \mathrm{Gyr}} \gtrsim 1 M_\odot \Rightarrow \tag{32}$$

Существуют различные подходящие решения, представленный ниже набор (почти) свободных параметров будем называть **наиболее успешным**, он же будет использоваться для дальнейших оценок:

$$\begin{cases} v \approx 10^{-7}\ \mathrm{GeV}, \\ u = 1, \\ \eta_\chi = 1, \\ u_\star = 0.0007, \\ T_c \approx 10^{-7}\ \mathrm{GeV}. \end{cases} \tag{33}$$

Анализ решения

Параметры (радиус, масса) Q-шаров зависят от их расположения в галактике. Например, современная масса Q-шаров на расстоянии $r = 0.05$ kpc от центра галактики:

$$m_Q\Big|_{r=0.05\ \mathrm{kpc}} \approx 5\ \mathrm{M}_\odot, \tag{34}$$

а радиус

$$R_Q\Big|_{r=0.05\ \mathrm{kpc}} \sim 10^9\ \mathrm{km}. \tag{35}$$

Будем называть **Q-шарами звездной массы** Q-шары, чьи массы больше или равны массе Солнца. Легко найти, в какой области галактики такие Q-шары расположены и их современное количество:

$$m_Q(r) = 1\ \mathrm{M}_\odot \Rightarrow r \approx 0.17\ \mathrm{kpc}, \tag{36}$$

$$N_Q^{stellar} = \int_{0\ \mathrm{kpc}}^{0.17\ \mathrm{kpc}} \frac{4\pi r^2 \rho(r)}{m_Q(r)} dr \approx 4 \times 10^9. \tag{37}$$

Анализ решения

Аналогично можно найти расстояние от центра галактики, на котором взаимодействие Q-шаров прекращается в приближении, что выделенный Q-шар поглощает всю массу:

$$m_Q(r) = 2m_\star \Rightarrow r \approx 16 \text{ kpc}, \tag{38}$$

Тогда современное число Q-шаров в галактике:

$$N_Q^{total} = \int_{0\text{ kpc}}^{16\text{ kpc}} \frac{4\pi r^2 \rho(r)}{m_Q(r)} dr + \int_{16\text{ kpc}}^{200\text{ kpc}} \frac{4\pi r^2 \rho(r)}{m_\star} dr \sim 10^{24}. \tag{39}$$

А современные массы и радиус Q-шаров лежат в пределах, соответственно,

$$\boxed{m_\star \approx 10^{-13}\ \mathrm{M}_\odot \leq m_Q(r) \lesssim m_Q(r=0) \approx 10\ \mathrm{M}_\odot,} \tag{40}$$

$$\boxed{R_Q(Q_\star) \approx 9 \times 10^4\ \text{km} \leq R_Q(r) \lesssim R_Q(r=0) \approx 4 \times 10^9\ \text{km}.} \tag{41}$$

Анализ решения

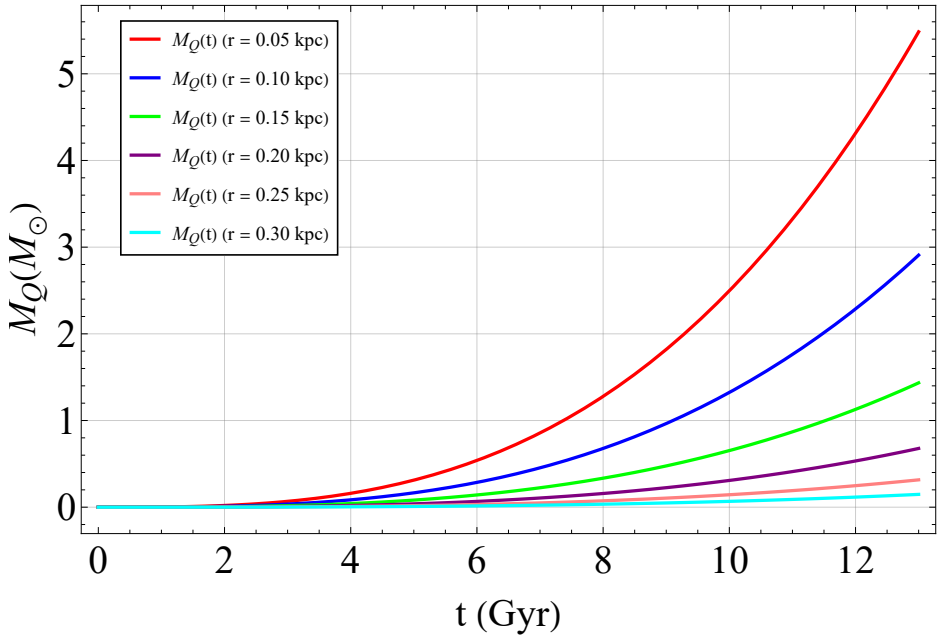

Рис.: Эволюция массы выделенного Q-шара на разных расстояниях от центра галактики.

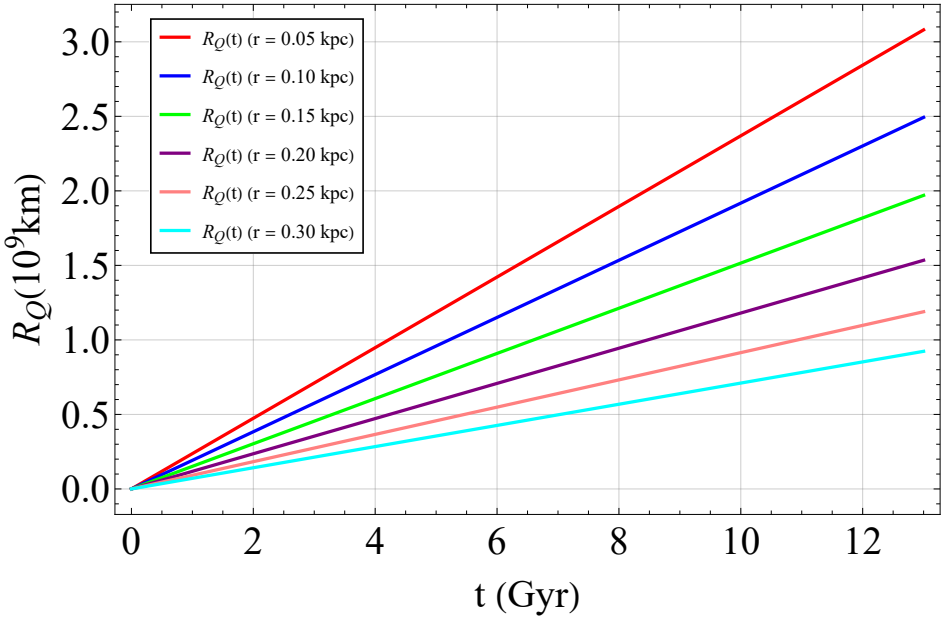

Рис.: Эволюция радиуса выделенного Q-шара на разных расстояниях от центра галактики.

Анализ решения

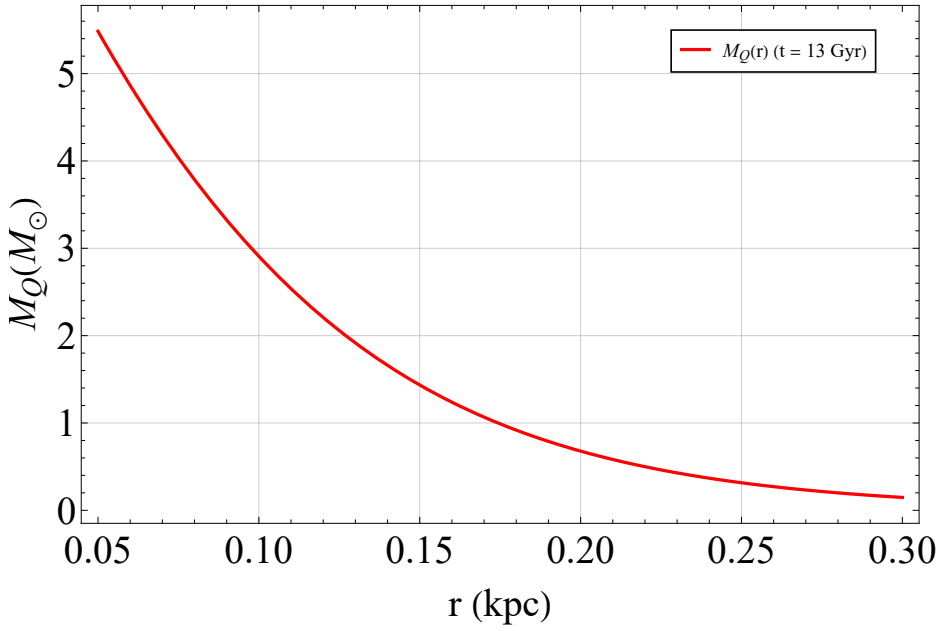

Рис.: Профиль массы современного выделенного Q-шара.

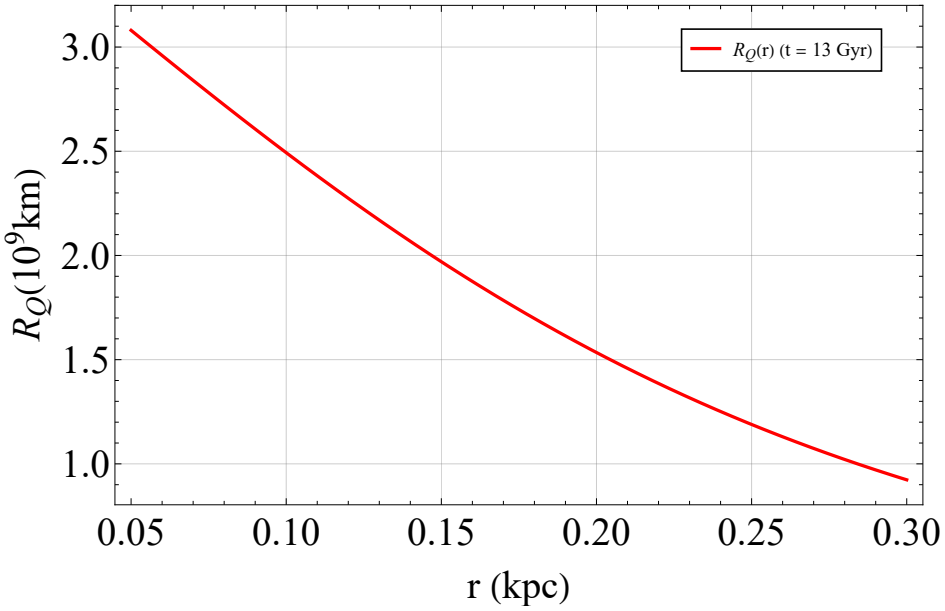

Рис.: Профиль радиуса современного выделенного Q-шара.

Анализ решения

$v \sim 10^{-7}$ GeV, $T_c \sim 10^{-7}$ GeV, $\eta_\chi = 1$, $u = 1$, $u_\star = 0.0007$						
r (kpc)	0.05	$0.17^{(1)}$	$0.30^{(2)}$	$8^{(3)}$	$16^{(4)}$	$200^{(5)}$
M_Q ($M_\odot$)	5	1	0.15	$10^{-12\,(6)}$	10^{-13}	10^{-13}
R_Q (km)	$10^{9\,(7)}$	10^9	10^9	10^5	10^5	$10^{5\,(8)}$

Таблица: Основные параметры современных Q-шаров.

1. Область, где находятся Q-шары звездной массы;
2. Радиус центральной области галактики;
3. Расстояние от центра галактики до Земли;
4. Расстояние от центра галактики, на котором Q-шары перестают взаимодействовать;
5. Радиус гало темной материи;
6. Масса порядка массы Юноны;
7. Радиус порядка расстояния от Солнца до Нептуна;
8. Радиус порядка двух радиусов Юпитера.

Анализ решения

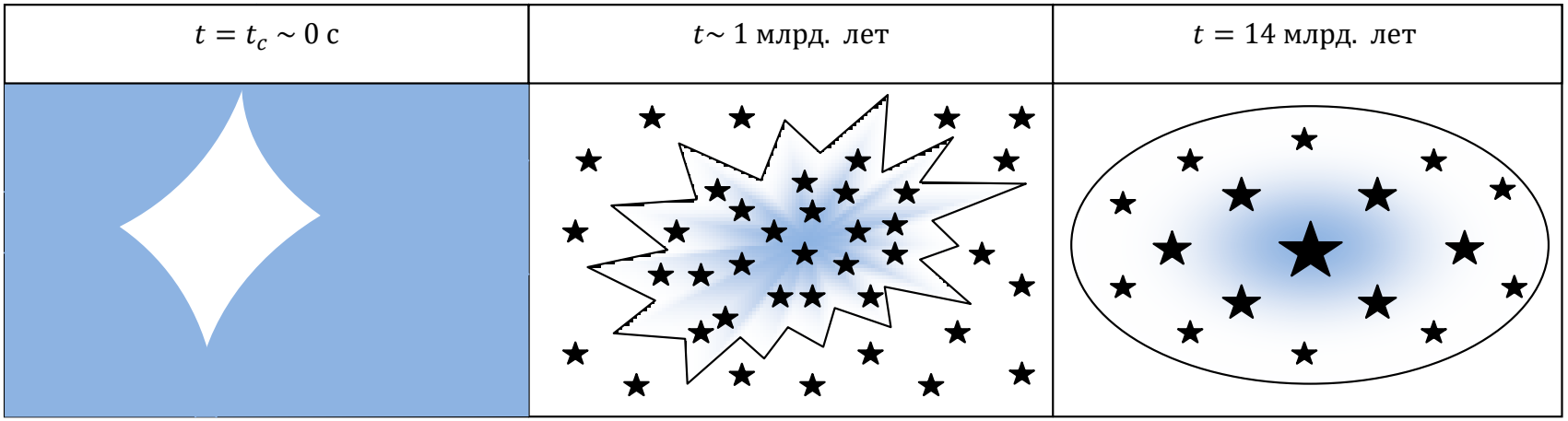

Рис.: Схематичное изображение модели слияния Q-шаров в галактиках. Первый этап: фазовый переход первого рода в ранней Вселенной, рождение космологических Q-шаров. Второй этап: космологические Q-шары участвуют в образовании галактик. Третий этап: в современной галактике расположены различные популяции Q-шаров – чем дальше от центра галактики, тем Q-шары легче.

Results and future work

- ✓ Распределение космологических Q-шаров по зарядам S. Troitsky, JCAP (2016) было уточнено;
- ✓ Получены космологические ограничения на параметр v лагранжиана;
- ✓ Две модели слияния Q-шаров: свободных космологических Q-шаров в плоской расширяющейся Вселенной и слияние Q-шаров в галактиках;
- ✓ Показано, что Q-шары в галактиках способны набирать значительные массы, однако, их конфигурация скорее напоминает "облака" темной материи;
- ✓ Современные Q-шары могут иметь различные популяции: чем дальше выделенный Q-шар расположен от центра галактики, тем он легче;
- ✓ В предложенных моделях Q-шары не могут закрыть mass-gap, так как они очень "рыхлые", однако, могут представлять интерес в других областях астрофизики и космологии;

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Данная работа выполнена в рамках гранта РНФ 22-12-00215