

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗВИТИЕ ГРАВИТАЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В УСЛОВИЯХ АННИГИЛЯЦИИ ВЕЩЕСТВА И АНТИВЕЩЕСТВА

Научный руководитель

д.ф.-м.н, проф.

Хлопов М.Ю.

Студент

Борисенко А.С.

Цель: изучение объектов антивещества, которые могут сформироваться в доменах. В рамках данной работы исследуется развитие гравитационной неустойчивости в условиях аннигиляции вещества и антивещества.

Задача: найти соотношение между неустойчивостью Джинса и эффектом продуктов аннигиляции давления

Аннигиляция на границах доменов

Основной реакцией, определяющей эволюцию границы между барионным и антибарионным доменами, является аннигиляция протона и антипротона:



Полная энергия, выделяющаяся в одном акте аннигиляции:

$$E_{\text{ann}} = 2m_p c^2 = 2 \times 938,27 \text{ МэВ} = 1,877 \text{ ГэВ}.$$

Для того чтобы домен антивещества мог существовать достаточно долго, его масса должна удовлетворять определённым ограничениям:

$$10^3 M_{\odot} \leq M \leq 10^5 M_{\odot}$$

Гравитационного давления в центре:

$$p_{\text{grav}} \sim \frac{GM^2}{R^4}$$

Давление ультрарелятивистской плазмы:

$$p_{\text{rad}} = \frac{1}{3} a T^4 \sim \frac{1}{3} n_a E_{\text{ann}}$$

Гравитационная неустойчивость в условии аннигиляции

Дисперсионное соотношение для звуковых волн с учётом гравитации:

$$\omega^2 = c_s^2 k^2 - 4\pi G \rho$$

Масса Джинса — минимальная масса флуктуации, способная к коллапсу:

$$M_J = \frac{4\pi}{3} \rho \left(\frac{\lambda_J}{2} \right)^3 = \frac{\pi^{5/2} c_s^3}{6G^{3/2} \rho^{1/2}}$$

$$M_J \propto c_s^3 \propto T^{3/2}$$

Нахождение оптимальной массы Джинса

Температура в зоне аннигиляции достигает $T \sim 10^7\text{--}10^8$ К.

Скорость звука в нагретой среде:

$$c_s = \sqrt{\frac{k_B T}{m_p}} \sim 300 \text{ км/с}$$

Если подставить численные значения ($\rho = n_b m_p$, $n_b \sim 10^{40} \text{ м}^{-3}$, $c_s \sim 3 \times 10^5 \text{ м/с}$) в формулу для массы Джинса, получится:

$$M_J \sim 2000 M_\odot$$

Сколлпсировать могут только сгустки с массой более $2000 M_\odot$.

Оценка отношения давлений

Если подставить $M \sim n_b m_p R^3$ (где n_b — плотность барионов) в формулу для гравитационного давления и положить $n_a = n_b$, тогда получится отношение:

$$\frac{p_{\text{rad}}}{p_{\text{grav}}} \sim \frac{n_b E_{\text{ann}}/3}{G n_b^2 m_p^2 R^2} = \frac{E_{\text{ann}}}{3 G n_b m_p^2 R^2}$$

Рассмотрим случай для массы Джинса. $M_{\odot} = 2 \times 10^{30}$ кг — масса Солнца. Тогда:

$$M = 2 \times 10^3 \times 2 \times 10^{30} = 4 \times 10^{33} \text{ кг}$$

Характерный радиус домена примем равным радиусу типичного шарового скопления или компактной карликовой галактики:

$$R \sim 1 \text{ пк} = 3 \times 10^{16} \text{ м}$$

Оценка отношения давлений

Из соотношения $M \sim n_b m_p R^3$ (с точностью до численного коэффициента порядка единицы) получается:

$$n_b \sim \frac{M}{R^3 m_p}$$

Подставляя численные значения:

$$n_b = \frac{4 \times 10^{33}}{(3 \times 10^{16})^3 \times 1,67 \times 10^{-27}} \sim 8,7 \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$$

$$E_{\text{анн}} = 2m_p c^2 = 3,01 \times 10^{-10} \text{ Дж},$$

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2},$$

$$m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ кг}.$$

Оценка отношения давлений

Подставим значения в формулу для отношения давления аннигиляции к гравитационному давлению:

$$\frac{p_{\text{rad}}}{p_{\text{grav}}} \sim \frac{3,01 \times 10^{-10}}{3 \times 6,67 \times 10^{-11} \times 8,7 \times 10^{10} \times (1,67 \times 10^{-27})^2 \times (3 \times 10^{16})^2} \sim 6,89 \times 10^9$$

Полученное значение $\gg 1$. Таким образом, давление аннигиляции всегда доминирует над гравитационным, и облако расширяется, а не сжимается.

Заключение

- Проведён анализ энерговыделения при протон-антипротонной аннигиляции. Показано, что в одном акте аннигиляции выделяется энергия $E_{\text{ann}} = 1,877 \text{ ГэВ}$, а продукты аннигиляции являются ультррелятивистскими.
- Выполнено сравнение давления продуктов аннигиляции с гравитационным давлением. Полученное отношение $p_{\text{rad}}/p_{\text{grav}} \sim 6,89 \times 10^9 \gg 1$ показывает, что давление аннигиляции доминирует над гравитационным. Именно это давление является главным препятствием для гравитационного сжатия.
- Рассмотрена модификация массы Джинса в условиях аннигиляционного нагрева. Аннигиляционный нагрев среды до $T \sim 10^7 - 10^8 \text{ К}$ увеличивает скорость звука до $c_s \sim 300 \text{ км/с}$, что даёт оценку массы Джинса $M_J \sim 2000 M_{\odot}$. Это значение удовлетворяет условию существования домена $10^3 M_{\odot} \leq M \leq 10^5 M_{\odot}$.
- Основная проблема для развития гравитационной неустойчивости в доменах антивещества — давление продуктов аннигиляции, превышающее гравитационное. Для её преодоления требуются дополнительные механизмы, например, наличие внутренних субдоменов вещества внутри антивещественного домена, которые могут локально изменять баланс давлений и создавать условия для гравитационного сжатия.