УДК 521.13

Р.Х.Юсупов

ГРАВИТАЦИОННОЕ САМОЗАМЫКАНИЕ НЕЙТРИНО ВО ВСЕЛЕННОЙ

Наличие во Вселенной темного вещества в виде нейтрино, взаимодействие которого с другим веществом осуществляется только с помощью полей тяготения, приводит к целому ряду важных космологических следствий. Пока температура нейтрино существенно больше их массы покоя, эти частицы ведут себя аналогично фотонам, внося лишь вклад в общую массу. При уменьшении кинетической энергии до массы покоя они переходят в режим холодного вещества и первыми начинают выстраивать крупномасштабную структуру Вселенной. Теперь нейтринное облако перестает расширяться и находится в состоянии равновесия под влиянием собственного поля тяготения. Такие нейтринные “протозвезды” рассматриваются в работе. При этом используется больцмановское распределение нейтрино и ньютоновская гравитация. Важно отметить, что характерный размер такого облака соответствует наблюдаемому ныне характерному размеру скопления галактик. Эта оценка близка к общепринятой, однако получена существенно проще стандартного подхода.

Сценарии образования скоплений галактик с помощью скучивания нейтрино рассматривались и ранее [1],[2],[3]. Механизм сводился к тому, что для нейтрино рассчитывалась критическая длина волны Джинса, для которой начинается рост возмущений. Пока эта длина много больше горизонта Вселенной, рост возмущений не заметен, поскольку он компенсируется фоновым космологическим расширением. Началом роста крупномасштабной структуры является момент, когда длина волны Джинса становится меньше горизонта. В рассматриваемом сценарии такой гипотезы не требуется. Рассчитывается характерный размер статической конфигурации. Тот факт, что в момент перехода нейтрино в нерелятивистскую область, облако имеет размер порядка горизонта, на данный момент времени свидетельствует о том, что оба подхода дают одинаковые величины для размера скоплений галактик.

Наличие массы покоя у нейтрино, как было отмечено многими авторами (см., например, [4],[5]), дает возможность для рассмотрения нового механизма образования крупномасштабной структуры Вселенной. При температуре $kT \sim m_\nu c^2$ (m_ν - масса нейтрино) нейтрино перестает быть релятивистским и ведет себя подобно обычному газу со средней температурой Вселенной. На этом этапе возмущения плотности нейтрино могут расти и создавать “нейтринные облака”, уравновешенные собственным гравитационным полем. С этого момента облако перестает участвовать в общем космологическом расширении. Оценим возможные параметры такой сферически-симметричной конфигурации.

Будем считать, что фоновое значение плотности нейтрино ровно n_0. Тогда, вводя разность потенциалов

$$\delta\varphi(r) = \varphi(r) - \varphi(R) \qquad (1)$$

можно предположить, что распределение концентрации нейтрино внутри облака

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{m_\nu\,\delta\varphi}{kT}\right). \qquad (2)$$

Соответствующая плотность массы нейтрино есть

$$\rho_\nu(r) = m_\nu n(r). \qquad (3)$$

Распределение возмущения потенциала задается уравнением Пуассона

$$\Delta(\delta\varphi) = 4\pi G\,\rho_\nu. \qquad (4)$$

Условие равновесия конфигурации определяется равенством сил, действующих на единицу объема

$$\frac{\partial P}{\partial r} = -\frac{\partial(\delta\varphi)}{\partial r}\rho_\nu, \qquad (5)$$

здесь давление P определяется формулой $P = n(r)kT(r)$. Тогда из уравнения (5) имеем

$$k\left[\frac{\partial n}{\partial r}T+\frac{\partial T}{\partial r}n\right]=-n m_{\nu}\frac{\partial(\delta\varphi)}{\partial r}$$
$$k\left[\frac{\partial(\ln n/n_0)}{\partial r}+\frac{\partial(\ln T)}{\partial r}\right]=-\frac{m_{\nu}}{kT}\frac{\partial(\delta\varphi)}{\partial r}.$$

Далее, воспользовавшись (2), получим

$$k\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{m_{\nu}}{kT}\delta\varphi\right)+\frac{\partial(\ln T)}{\partial r}\right]-\frac{m_{\nu}}{kT}\frac{\partial(\delta\varphi)}{\partial r}-m_{\nu}\delta\varphi\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{kT}\right)+\frac{\partial(\ln T)}{\partial r}=0,$$
$$\frac{m_{\nu}\delta\varphi}{kT^2}\frac{dT}{dr}+\frac{1}{T}\frac{dT}{dr}=0.$$

Из последнего уравнения имеем следующее выражение

$$\frac{T'}{T}\left(1+\frac{m_{\nu}\delta\varphi}{kT}\right)=0, \qquad (6)$$

которое, при условии выполнения равновесия для распределения Больцмана, предоставляет две возможности:

Постоянное распределение температуры, соответствующей фоновому значению. При этом концентрация нейтрино определяется после подстановки $T=T_0=const$ в уравнение Пуассона (4). Полученное уравнение имеет вид

$$\Delta(\delta\varphi)=4\pi G m_{\nu} n_0 \exp\left(\frac{m_{\nu}\delta\varphi}{kT_0}\right). \qquad (7)$$

Введем следующие обозначения:

$$\psi=\frac{m_{\nu}}{kT_0}\delta\varphi;\quad d^{-2}=\frac{4\pi G m_{\nu}\rho_0}{kT_0};\quad r=\rho d, \qquad (8)$$

здесь ψ - безразмерный потенциал, ρ - безразмерный радиус и d - характерный размер. С учетом этих обозначений уравнение для потенциала (7) примет вид

$$\frac{1}{\rho}\frac{d^2}{d\rho^2}(\rho\psi)=e^{-\psi}. \qquad (9)$$

Это уравнение близко к уравнению Дебая для экранировки зарядов в плазме. Граничные условия для него в соответствии со сказанным выше задаются следующим образом

$$\psi(\rho\to\infty)\to 0;\ \left(\frac{d\psi}{d\rho}\right)_{\rho=0}=0. \qquad (10)$$

Из уравнения (9) следует, что $d^2\psi/d\rho^2>0$ при $\rho=0$. Это означает, что в начале координат потенциал ψ имеет минимум. В общем случае решение этого уравнения удается получить только численно. В случае относительно малого безразмерного потенциала решение можно получить, разлагая в ряд экспоненту вблизи нуля

$$\psi''+\frac{2}{\rho}\psi'=1-\psi \qquad (11)$$

($'$ - производная по ρ). Представим теперь решение этого уравнения как сумму общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного. Последнее легко указать – это $\psi=1$. Общее решение однородного уравнения удобно получить, записав его в виде

$$\frac{1}{\rho}\frac{d^2}{d\rho^2}(\rho\psi)=-\psi \qquad (12)$$

и, вводя новую неизвестную функцию $u=\rho\psi$, приведем (12) к виду

$$\frac{d^2u}{d\rho^2}=-u,$$

общее решение которого есть: $u=A\sin(\rho+\alpha)$. Тогда для ψ имеем:

$$\psi = \frac{A}{\rho} sin(\rho + \alpha).$$

Выбор констант интегрирования определяется граничными условиями. Отсутствие сингулярности при $\rho \to 0$ достигается выбором $\alpha = 0$. ψ на границе конфигурации достигается выбором $A = -\pi / 2$. Таким образом решение (11), удовлетворяющее граничным условиям, имеет вид:

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{2\rho} sin(\rho). \quad (13)$$

С учетом разложения в ряд при малом ρ тригонометрических функций $cos(\rho) \approx 1 - \rho^2 / 2$, $sin(\rho) \approx \rho - \rho^3 / 3$ легко показать, что решение для безразмерного потенциала остается конечным при $\rho = 0$:

$$\psi(0) = 1 - \frac{\pi}{2},\ \psi'(0) = 0,\ \psi''(0) = -\frac{2\pi}{3}.$$

В этом случае распределение концентрации нейтрино максимально при $\rho = 0$ и обращается в фоновое при $\rho = \pi / 2$.

Приведем оценку линейного размера такой конфигурации в расширяющейся Вселенной. Характерный радиус искомой определяется значением параметра d. Открытие массы нейтрино приводит к предположению , что подавляющая часть плотности вещества во Вселенной определяется его массой. В процессе остывания нейтрино перестают быть релятивистскими при температуре $kT \approx m_\nu c^2$. С этого момента средняя плотность вещества во Вселенной меняется с течением времени согласно закона

$$\rho_\nu = \frac{1}{6\pi G t^2}.$$

Подставив эту формулу в уравнение для d из (8) получим при $t = t_0$

$$d = \sqrt{\frac{3}{2}} t_0 c. \quad (14)$$

Согласно имеющимся оценкам для массы нейтрино в пределах от 10 до 0,1 эВ можно оценить этот размер.

Момент рекомбинации водорода соответствует температуре порядка 3000 К. При этом характерный размер Вселенной до горизонта был в 1000 раз меньше сегодняшнего $R_г = 10^{28} см$, то есть на момент рекомбинации размер горизонта был равен $R_г = 10^{25} см$. Температура, при которой нейтрино с массой 1 эВ становятся нерелятивистскими и могут создавать конфигурацию типа рассмотренной выше, соответствует температуре $\approx 10000\ K$. Такая температура во Вселенной была в момент, когда ее размер был в 3000 раз меньше сегодняшнего. Заметим, что температура во Вселенной падает пропорционально ее линейному размеру. Образовавшееся в тот момент времени нейтринное облако при массе покоя нейтрино 1 эВ (то есть при размере горизонта на данный момент времени) перестает расширяться (гравитационное замыкание). В настоящий момент времени размер нейтринного облака порядка 10^{24} *см*. Эта величина близка к характерному размеру скопления галактик. Таким образом, самозамыкание нейтринных облаков может быть естественной затравкой при образовании скоплений галактик. При этом в начале формируется скопление нейтрино, а затем в созданное им гравитационное поле попадает обычное вещество, которое и определяет видимую часть Галактики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я.Б. УФН, 89, 647 (1966).
2. Герштейн С.С., Зельдович Я.Б. Письма в ЖЭТФ, 4, 174 (1966).
3. Szalay A.S., Marx G Astron. Astrophys. 49, 437 (1976).
4. Belesev A.I. et al. Phys.Lett B. 350, 263 (1995).

5. Assamagan K. Et al. Phys.Lett B. 335, 231 (1994).