

Сопутствующий расширению ньютоновский потенциал галактик и их скоплений вместо тёмной материи

Захид Закир¹

Аннотация

Исследовано растяжение ньютоновского потенциала (НП) в ранние эпохи и показано, что наблюдаемые эффекты, обычно приписываемые тёмной материи, могут быть объяснены таким растяжением. Рост со временем радиуса гравитационно-связанной области (ГСО) и сохранение гравитационной энергии приводят к новому сценарию, в котором значения НП сохраняются в расширяющемся объеме, тогда как в физическом объеме они растягиваются. Действительно, сохранение энергии в расширяющемся объеме требует для значений НП, чтобы они сопутствовали расширяющимся слоям. Кроме того, радиус ГСО растёт со временем из-за уменьшения скорости расширения и различные слои вокруг галактики перестают расширяться в разное время. Таким образом, чем дальше расположен слой от галактики, тем дольше он расширялся и утолщался, в то время как разность потенциалов на его границах оставалась неизменной. Это сдвигает значения НП вокруг галактики пропорционально расстоянию r и, как результат, гравитационное ускорение, от $1/r^2$ зависимости НП превращается в $1/r$ зависимость, как у центробежного ускорения. Этот факт естественно объясняет известные эмпирические факты, такие как плато в кривых вращения и зависимости скорость-масса для галактик и дисперсию скоростей в скоплениях галактик.

PACS: 95.30.Sf, 95.35.+d, 98.65.Cw, 98.62.Ck

Ключевые слова: гравитация, расширение Вселенной, кривые вращения, скопления галактик

Метрическое расширение пространства означает, что расширяющийся элемент объема $V(t) \sim a^3(t)$, например внутренность тонкого слоя пыли, содержит больше единиц физического объема, чем тот же самый объем в более ранний момент $V(t_0)$. Возросший объем содержит те же самые галактики, но теперь их поля тяготения распространяются на объем, больший на величину $\delta V = V(t) - V(t_0)$.

Если бы галактики удалились друг от друга в статическом пространстве, то возросшее расстояние между соседями было бы занято потенциалом каждой галактики, существовавшим прежде на том же самом физическом расстоянии от него. В расширяющемся же пространстве вопрос нетривиален и есть две возможности для значений потенциала - или они сохраняются на тех же самых физических расстояниях и потенциал не изменяется, или они сопутствуют разбегающимся пробным частицам и потенциал становится «растянутым».

Здесь критерием выбора выступает энергия гравитационного поля, которая в общем случае должна сохраняться. Поэтому, для применения теории гравитации к межгалактическому расширяющемуся пространству нужно ответить на вопрос о том, что

¹ *Центр теоретической физики и астрофизики, Ташкент, Узбекистан, zahidzakir@theor-phys.org*

происходит энергией поля тяготения галактик в расширяющемся объеме. Ответ сводится к выбору одной из двух возможностей, когда энергия поля:

а) сохраняется в физическом элементе объема, но тогда она растёт (по модулю) в расширяющемся элементе объема $V(t)$;

б) сохраняется в расширяющемся элементе объема $V(t)$, но тогда она уменьшается (по модулю) в физическом элементе объема.

Простейшее решение, принятое как стандартное, основано на первой версии (а) прямой экстраполяцией НП к расстояниям масштаба галактик [1]. В этом случае для вращающейся галактики массы M баланс центробежных и гравитационных сил $v_c^2 / r = GM(r) / r^2$ даёт для зависимости от расстояния скорости вращения галактики $v_c(r) \sim r^{-1/2}$. Но, для спиральных галактик наблюдения показывают плато в кривых вращения [1] $v_c(r) \sim const$. Это требует предположения о гало небарионной тёмной материи, распределенной как $M(r) \sim r$. Таким образом, стандартное решение требует новых гипотез и, кроме того, неудовлетворительно теоретически, так как энергия поля растёт со временем в любом расширяющемся элементе объема, включая и вселенную в целом.

В данной статье сформулировано новое решение, основанное на втором ответе (б). В нём сохранение энергии поля в любом расширяющемся элементе объема приводит к её сохранению во всей вселенной тоже, и таким образом, по крайней мере теоретически, этот подход более предпочтителен.

Другая новая особенность этого решения - адекватный учёт существования и эволюции радиуса ГСО r_c галактики, внутри которого поле статично [2]. Этот радиус соответствует расстоянию, где гравитационная потенциальная энергия частицы в поля галактики компенсирует кинетическую энергию, соответствующую скорости разбега $v_H(r) = Hr$, где $H(a) = \dot{a} / a$ - параметр Хаббла, что даёт:

$$H^2 r_c^2 / 2 = GM / r_c, \quad r_c = (2GM / H^2)^{1/3}. \quad (1)$$

Скорость разбега *снаружи* r_c восстанавливается не сразу, а постепенно как:

$$v_{H(s)}(r) = H_s r, \quad H_s(r) = H \cdot (1 - r^3 / r_c^3)^{1/2}. \quad (2)$$

Взяв $H = h \times 100 \text{ км} \times \text{с}^{-1} \times \text{Mnc}$, при современном значении $h = h_0 = 0.7$ и массах $M = (10^{10}; 10^{11}; 10^{12}; 10^{13}) M_\odot$, имеем $r_{c(0)} = (0.26; 0.56; 1.2; 2.6) \text{ Mnc}$ соответственно, тогда как в ранние эпохи с $h = 10$ имеем $r_{c(0)} = (0.044; 0.095; 0.20; 0.44) \text{ Mnc}$. Таким образом, в эпоху формирования галактик r_c имел величину размера галактики и затем увеличился со временем как $r_c \sim H^{-2/3}$ из-за уменьшения H с ростом масштабного фактора $a(t)$.

Пусть в ранние эпохи некий пространственный слой вокруг галактики с начальным радиусом r и толщиной Δr участвует в расширении. Через какое-то время r_c становится больше радиуса слоя и далее слой станет статичным, достигая фиксированного радиуса $r \rightarrow r'$ и толщины $\Delta r \rightarrow \Delta r'$. Такие расширившиеся, а затем последовательно застывшие слои расположатся настолько дальше от их начальных радиусов r , чем больше времени каждый из них расширялся и утолщался. В первом линейном приближении утолщение пропорционально расстоянию:

$$r \rightarrow r', \quad \Delta r \rightarrow \Delta r' = (r' / r_c) \cdot \Delta r'. \quad (3)$$

В таких пространственных слоях вокруг галактики, которые слой за слоем расширились и затем стабилизировались, поле тяготения окажется деформированным из-за сохранения энергии поля в каждом из слоёв.

Рассмотрим теперь что происходит в этих слоях с гравитационным потенциалом. В каждом из слоёв деформация происходила по разному - чем больше времени расширялся данный слой, тем больше становилось падение плотности энергии поля в этом слое по сравнению с начальным её значением. Плотность энергии $W(r) = -(\nabla\phi_g)^2 / 8\pi G$ поля $\phi_g = -GM / r$ равна $W(r) = -GM^2 / 8\pi r^4$, и энергия поля в сферическом слое $r_2 - r_1$ есть $U(r_2 - r_1) = [\phi_g(r_1) - \phi_g(r_2)]M / 2$. При расширении однородного пылевого шара сохранение энергии поля требует, чтобы разность значений гравитационного потенциала между слоями не изменялась и значения потенциала должны *сопутствовать* им. Таким образом, если понятие релятивистского поля потребовало введения *запаздывающих* потенциалов, то понятие такого поля в расширяющемся пространстве требует введения в теории гравитации *сопутствующих потенциалов*.

В слое же с начальной толщиной Δr , который позже расширился и стал толще как в (3), условие сохранения гравитационной энергии при сдвиге и утолщении приобретает вид:

$$\phi_g(r + \Delta r) - \phi_g(r) = \phi_g(r' + (r'/r_c) \cdot \Delta r') - \phi_g(r'). \quad (4)$$

т.е. разность потенциалов на границах слоя не меняется в ходе расширения. Для сохраняющейся гравитационной энергии в слое, таким образом, получаем:

$$\Delta U = -\frac{GM}{r^2} \Delta r = -\frac{GM}{r'^2} \cdot \frac{r'}{r_s} \Delta r' = -\frac{GM}{r' r_s} \Delta r', \quad (5)$$

от которого находим измененное гравитационное ускорение

$$w_{g(s)}(r') = -\frac{GM}{r' r_s}. \quad (6)$$

Итак, вне ГСО ньютоновский потенциал после растяжения в ходе расширения переходит в сопутствующий потенциал $\phi_g(r) \rightarrow \phi_g(r')$ и соответственно модифицируется гравитационное ускорение $w_g(r) \rightarrow w_{g(s)}(r')$.

Как результат, в таком растянутом потенциале баланс центробежных и гравитационных сил приводит к постоянной скорости вращения галактики в области $r > r_c$:

$$\frac{v_c^2}{r'} = \frac{GM}{r_c r'}, \quad v_c^2 = \frac{GM}{r_c} = const. \quad (7)$$

Это объясняет плато в кривых вращения галактик [1] и позволяет определить r_c по данным для масс и скоростей вращения $r_c = GM / v_c^2$. Для каждого значения r наблюдения дают $r_c \ll r$, что естественно, так как исходное значение r_c было немного меньше нынешнего радиуса галактики. Отметим, что объединение галактик в скопления с исключением из потока расширения, когда удаляются лишь скопления, произошло тогда, когда современное значение r_c стало больше половины среднего расстояния между галактиками в скоплениях.

Из (7) следует соотношение между скоростью вращения и массой галактики – вставляя r_c из (1) в (7) получаем:

$$v_c^2 = (GMH_c)^{2/3}, \quad v_c^3 = (GH_c)M. \quad (8)$$

Здесь фигурируют H_c - значение параметра Хаббла в период формирования поля галактики и барионная масса галактики M внутри r_c .

Из наблюдений известна эмпирическая формула – барионное соотношение Талли-Фишера (БТФ) $M_b = \alpha v^\beta$, где $\alpha = const.$ и $\beta \simeq 3 \div 4$ в разных оценках массы. Наблюдаемая барионная масса галактики M_b , включая также массу снаружи r_c , превышает M и, следовательно, полученная в теоретическая зависимость $M \sim v^3$ с $\beta = 3$ действительно дает нижний предел для β .

Но для грубой оценки параметров в ранние эпохи мы можем рассмотреть также верхний предел с $\beta = 4$, когда с выражением для массы $M = \alpha v^4$ даёт $H_c = (G\alpha v)^{-1}$. Из наблюдаемых скоростей вращения $v \sim 200 \text{ км} \times \text{с}^{-1}$ и эмпирическая величина $\alpha \simeq 50 M_\odot \times \text{км}^{-4} \times \text{с}^4$ тогда приводит к оценкам $H_c \sim 20 \text{ км} \times \text{с}^{-1} \times \text{кпс}^{-1}$ и $r_c \sim 5 \div 10 \text{ кпс}$, которые являются удовлетворительными, так как это расстояние совпадает с теми расстояниями, где начинается плоский участок кривых вращения. Если же исключим скорость v , то мы находим выражение H_c через M и параметр α , а затем, с учётом (1), выражение и для r_c :

$$H_c^{-1} = G(\alpha^3 M)^{1/4}, \quad r_c = G(\alpha M)^{1/2}. \quad (9)$$

Согласно (9), галактике с большей массой должно соответствовать меньшее значение H_c . Это означает, что формирование более массивной галактики завершилось в более позднюю эпоху, чем более лёгкой галактики, что вполне естественно.

Для эллиптических галактик, которые не вращаются, есть соотношение Фэбера-Джексона $M = \alpha v_d^4$, подобное БТФ, но для дисперсии скоростей v_d^2 и оно также согласуется с растянутым потенциалом.

Теперь результаты для поля отдельной галактики применим к группам и скоплениям галактик. Постоянство кривых вращения, из-за принципа эквивалентности, применимо также и к системе двух галактик полной массы $M_1 + M_2$, которое можно свести в движению вокруг центра масс тела с приведенной массой $\mu = M_1 M_2 / (M_1 + M_2)$. Поэтому растяжение потенциала также может быть проверено путём наблюдения динамики двойных систем, в которых скорости вращения, зависящие от полной массы, должны быть практически независимыми от радиуса системы.

Если размер двойной системы галактик близок к размеру каждого из них, то часть вещества падает в центр масс системы, формируя балдж. Кроме того, центры масс каждой из прежних галактик с протянутым потенциалом, будет вращаться с прежней скоростью, будучи прототипом волн плотности, преобразовывающихся позже в два или более спиральные рукава. Подобный сценарий может быть реализован и в системе из трёх галактик, где одна из галактик может иметь прямую или противоположную скорость, и который позже преобразовывается к спиральной галактике с тремя или больше спиральными руками. Таким образом, при растянутом ньютоновом потенциале близкие системы эллиптических или нерегулярных галактик могут преобразоваться со временем в спиральные галактики. Отметим, что постоянство кривых вращения и большие угловые моменты спиральных галактик следуют из большого углового момента начальной двойной системы галактик.

Наконец, рассматривая в рамках новой трактовки группы и скопления галактик, мы находим, что дисперсия скоростей в них будет определяться также растянутыми

потенциалами и соотношениями (7)-(8). Так как скопления формируются существенно позднее, чем эпоха когда сформировался растянутый потенциал галактик, мы можем принять в (8) приблизительно $H_c \sim H_0$, что для барионной массы скопления даёт тогда соотношение:

$$\frac{M_{cl}}{M_{gal}} \simeq \frac{v_{c(cl)}^3}{v_{c(gal)}^3}. \quad (10)$$

При $v_{c(gal)} \sim 200 \text{ км} \times \text{с}^{-1}$ для $M_{gal} \sim 10^{11} M_{\odot}$, в скоплении с дисперсией скоростей $v_{c(cl)} \sim 1000 \text{ км} \times \text{с}^{-1}$ соотношение (10) даёт $M_{cl} \sim 10^{14} M_{\odot}$, что согласуется с наблюдательными оценками.

Таким образом растянутый НП, спадающий с расстоянием медленнее, объясняет практически все необычные эффекты галактической астрофизики, приписываемые тёмной материи и может быть взят в качестве отправной точки для исследований крупномасштабного структурообразования.

Литература

1. Beringer J. et al. (PDG) (2012) Phys. Rev. **D86**, 010001.
2. Carrera M., Giulini D. (2010) Rev. Mod. Phys. **82**, 169.