Вселенная. Постньютоновская (классическая) модель.

©2005 *В.М.Мясников* https://yadi.sk/i/I99Kh1zksiyYh

Аннотация.

Название статьи точно отображает её содержание: классические методы ньютоновской физики в совокупности с новым (постньютоновским) законом тяготения позволяют построить модель Вселенной, все свойства которой объясняются современным её состоянием, не требующим апелляции к «большому взрыву», «инфляции» и т.п. Совершенно естественно, основываясь только на законе тяготения, выводится закон Хаббла, космологическое красное смещение, расширение Вселенной (именно в такой последовательности!), полностью решается т.н. проблема «темной энергии» (антигравитация, отрицательная плотность, ускоренное расширение Вселенной и т.п.), объясняется иерархическая структура материи во Вселенной, доказывается (в рамках этой модели) т.н. принцип Маха, т.е. силы инерции являются «слегка замаскированными» гравитационными силами, порождаемыми совокупным веществом Вселенной и, тем самым, устраняется сама необходимость различения инертной и гравитационной масс, и др.

Содержание:

1. Введение.

Статья написана по материалам глав IV и V моей книги [1]. Для чтения статьи желательно знакомство с книгой (главы I - V), а также с основными положениями ньютоновской теории гравитации. Я постарался написать без конкретных ссылок на книгу, приведу только определение основного математического объекта – *кватера*, который я повсеместно использую в моих работах.

Кватером (от лат. *quater* — *четырежды*, *четыре раза*) я называю кватернион специального вида, с мнимой скалярной частью и вещественной векторной,

$$Q = \alpha^* + \vec{\mathbf{r}} .$$

Здесь α – вещественный физический скаляр, звездочкой я обозначаю умножение на мнимую единицу, т.е. $\alpha^* = \alpha \cdot 1^*$, где $1^* = \sqrt{-1}$ — мнимая единица, $\vec{\mathbf{r}}$ — радиус-вектор. Достоинством кватеров является возможность задания точек пространства (радиусом-вектором) с некоторой скалярной характеристикой (α — время, масса и др.), с другой стороны, при вычислениях с ним можно работать как с “числом”. Пример: кватерное пространство-время $\mathbf{X} = \left\{ c^*t + \vec{\mathbf{r}} \right\}$, по смыслу близкое к пространству-время Минковского, но существенно отличное от него по идеологии и математике (см. [1], гл. III).

2. Пространство-масса. Закон тяготения. Модель материальной точки.

Материальной точкой в физике принято называть тело, имеющее массу, и размерами которого в рассматриваемых условиях можно пренебречь. Вместе с размерами пренебрегают также формой, структурой, химическим составом и прочими свойствами этого тела за исключением массы и положения в пространстве. Пусть в пространстве имеется одна единственная материальная точка M с массой m.

Пространством-масса относительно материальной точки (тела) массы m я называю кватерное пространство

$$\Re = \left\{ \mathbf{R} \right\} = \left\{ -r_g^* + \vec{\mathbf{r}} \right\} = \left\{ -\frac{Gm^*}{c^2} + \vec{\mathbf{r}} \right\} . \qquad (1)$$

Здесь G — гравитационная постоянная, c — скорость света в вакууме и

$$r_g = \frac{Gm}{c^2} \tag{2}$$

— величина, которую я называю *гравитационный радиус массы* (тела) m.

Таким образом, материальная точка массы m, с одной стороны, определяет пространство-масса (1), с другой стороны, как известно, — гравитационное поле. Представляется естественным отождествить кватеры пространства-массы и гравитационный потенциал, порождаемые массой m, точнее — их нормированные безразмерные значения

$$\frac{1}{c^2}\Phi = \frac{\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|} \quad \Rightarrow \quad \frac{\varphi^* + \vec{\mathbf{A}}}{c^2} = \frac{-r_g^* + \vec{\mathbf{r}}}{|\mathbf{R}|}.$$

В лоренцевой калибровке векторную часть потенциала можно отбросить, и окончательно получаем выражение для потенциала на расстоянии r от материальной точки

$$\varphi = c^2 \frac{-r_g}{\sqrt{|r_g^2 - r^2|}} = \begin{cases} -\dfrac{\gamma m}{\sqrt{r^2 - r_g^2}}, & r > r_g \\ -\dfrac{\gamma m}{\sqrt{r_g^2 - r^2}}, & 0 \le r < r_g \end{cases} \tag{3}$$

Сферу $r = r_g$, с центром в материальной точке и радиуса r_g, называем *гравитационной сферой массы (тела)* m (не путать со сферой Шварцшильда, которую иногда также называют *гравитационной*. Аналогом гравитационной сферы в метрике Шварцшильда является центр сферы Шварцшильда). Гравитационная сфера делит пространство в системе отсчета материальной точки на два — “*внешнее*” $r > r_g$ и “*внутреннее*” $0 \le r < r_g$.

Сила, действующая на пробную частицу массы m', находящуюся на расстоянии r от массы m, равна

$$\vec{\mathbf{F}} = -m' \cdot \operatorname{grad}\varphi = \begin{cases} -\dfrac{Gmm'\vec{\mathbf{r}}}{\left(r^2 - r_g^2\right)^{3/2}}, & r > r_g \\ \dfrac{Gmm'\vec{\mathbf{r}}}{\left(r_g^2 - r^2\right)^{3/2}}, & 0 \le r < r_g \end{cases} \tag{4}$$

Закон тяготения (4) предлагаю назвать *постньютоновским*.

В первом случае сила направлена к центру (к гравитационной сфере), во втором — от центра (также к гравитационной сфере !). Все это можно представить таким образом, что вся масса m «локализована» на поверхности гравитационной сферы и притягивает к себе массивные тела как изнутри, так и извне. При этом следует ясно понимать, что «на самом деле» никакой сферы нет, и о каком-либо распределении массы на этой сфере не может быть и речи. В частности бессмысленно ставить вопрос об экспериментальном подтверждении или опровержении существования гравитационной сферы, ибо никакой эксперимент не может ни подтвердить, ни опровергнуть её существования. Гравитационная сфера — это просто термин, означающий, что законы гравитации сформулированы так, как будто (при нашем макроскопическом здравом смысле) эта сфера действительно существует. Именно поэтому понятие гравитационной сферы оказывается чрезвычайно удобным, и мы будем им широко пользоваться. В дальнейшем, материальную точку, её гравитационную сферу, оба пространства с ней связанные, закон тяготения для этих пространств и т.д., называем *моделью материальной точки*

Во внешнем пространстве материальной точки, во всех реальных физических ситуациях $r \gg r_g$ (для Земли $r_g = 0{,}45\,\text{см}$ и $\dfrac{r_g}{R_\oplus} = 7 \cdot 10^{-10}$), закон тяготения (4) фактически совпадает с ньютоновским законом тяготения. Поэтому здесь о законе тяготения во внешнем пространстве говорить не будем (а поговорить есть о чем — это и черные дыры, смещение перигелия, асимметрия активной и пассивной гравитационных масс и даже “«Специальная общая» теория относительности”. [3]).

Единственным, доступным нам «примером» «внутреннего» пространства является наша Вселенная (Метагалактика). И замечательно, что приведенные ниже весьма абстрактные рассуждения, как нельзя лучше соответствуют нашим представлениям о Вселенной.

3. Вселенная. Гравитационная сфера. Космологическое красное смещение.

Случай «внутреннего» пространства материальной точки представляет собой хорошую модель нашей Вселенной. Как мы уже отмечали (см. [1], гл. IV), находясь во «внутреннем» пространстве, геометрический центр «тела» можно выбирать в любой «внутренней» точке. Для однородной и изотропной Вселенной это равносильно тому, что все её точки равноправны, и в качестве точки наблюдения можно выбрать любую. Кроме того, из свойства однородности следует, что достаточно проследить судьбу одного элемента объема вещества, ибо судьба всех остальных в точности такая же.

Итак, пусть $r < r_g$. Обозначим M — массу Вселенной, тогда (см. (2))

$$r_g = R = \frac{GM}{c^2} \tag{5}$$

Закон тяготения (4) запишется для этого случая

$$\vec{\mathbf{F}} = \frac{GMm'\vec{\mathbf{r}}}{\left(R^2 - r^2\right)^{3/2}}, \quad 0 \le r < R , \tag{6}$$

т.е. сила, действующая на пробную частицу массы m', направлена от центра. Везде далее за положительное направление выбрано направление от точки наблюдения (центра), что дает нам возможность не пользоваться векторными обозначениями.

Дифференциальное уравнение движения пробной частицы имеет вид

$$\ddot{r} = \frac{GMr}{\left(R^2 - r^2\right)^{3/2}} , \tag{7}$$

следовательно, частица движется от центра ускоряясь, а посему естественно положить её скорость в центре равной нулю. Интегрируя (7), вводя новую переменную $\dot{r} = V(r)$ при условии $V = 0$ при $r = 0$, находим квадрат скорости

$$\left(\dot{r}\right)^2 = V^2 = \frac{2GM}{\sqrt{R^2 - r^2}} - 2c^2,$$

откуда скорость свободного падения пробной частицы на гравитационную сферу для $r \ll R$

$$V^2 = \frac{2GM}{\sqrt{R^2 - r^2}} - 2c^2 \approx 2c^2[(1 + \frac{1}{2}\frac{r^2}{R^2}) - 1] = c^2\frac{r^2}{R^2} ,$$

или

$$V = \frac{cr}{R} = rH , \tag{8}$$

где

$$H = \frac{c}{R} = \frac{c^3}{GM}, \tag{9}$$

— постоянный (независящий от r) коэффициент пропорциональности в зависимости (8). Зависимость (8) известна в космологии как закон Хаббла, поэтому постоянную H естественно назвать постоянной Хаббла.

Таким образом, удаленные галактики находятся в состоянии свободного падения под действием гравитационных сил. Отсюда, в частности, можно сделать вывод, что так называемое *космологическое* красное смещение можно интерпретировать и как *доплеровское*

$$\lambda_{набл} = \lambda_{исп}(1 + \frac{V}{c}) \quad \Rightarrow \quad Z = \frac{\lambda_{набл} - \lambda_{исп}}{\lambda_{исп}} = \frac{V}{c}, \quad V \ll c , \tag{10}$$

но также и как *гравитационное*

$$\lambda_{набл} = \lambda_{исп}(1 + \frac{\Delta\varphi}{c^2}), \quad \Delta\varphi \ll c^2 ,$$

где $\Delta\varphi$ — разность модулей ньютоновских гравитационных потенциалов в точке испускания света и в точке наблюдения. Учитывая, что в точке наблюдения (см. (3) при r = 0) $\varphi = -c^2$, ньютоновская разность потенциалов для точки, удаленной на r от точки наблюдения (и следовательно, на $R - r$ от гравитационной сферы), имеет вид

$$\frac{\Delta\varphi}{c^2} = \frac{1}{c^2}\cdot\left(\frac{GM}{R-r} - c^2\right) = \frac{R}{R-r} - 1 \approx \frac{r}{R}, \quad r \ll R.$$

Таким образом, гравитационное красное смещение

$$\lambda_{набл} = \lambda_{исп}(1+\frac{r}{R}) \quad \Rightarrow \quad Z = \frac{\lambda_{набл} - \lambda_{исп}}{\lambda_{исп}} = \frac{r}{R} = \frac{rH}{c}. \tag{11}$$

Сравнивая (10) и (11) и имея в виду (9), еще раз записываем закон Хаббла для $r \ll R$

$$V = rH = cZ, \tag{12}$$

где Z — в равной степени, *космологическое*, *доплеровское* или *гравитационное* красное смещение.

Можно ли утверждать, что наблюдаемое космологическое красное смещение является доказательством расширения Вселенной? Ответ зависит от того, что понимается под «расширением Вселенной». Если под расширением Вселенной понимать удаление далеких объектов от любой точки наблюдения или, что то же самое, взаимное удаление всех далеких объектов друг от друга, то ответ утвердительный, т.е. космологическое красное смещение, интерпретируемое как доплеровское, действительно доказывает расширение Вселенной. Но интерпретация космологического красного смещения как гравитационного указывает лишь на распределение гравитационного потенциала во Вселенной (Метагалактике), порождаемого совокупным веществом Вселенной (Гравитационной сферой), а удаление далеких галактик является просто свободным падением этих галактик в гравитационном поле Гравитационной сферы Вселенной, т.е. является внутренним явлением во Вселенной. Можно ли это явление рассматривать как расширение Вселенной как целого? Предлагаемая теория пока не может ответить на этот вопрос.

> Современные представления о Вселенной как целого исходят из идеальной модели однородной и изотропной Вселенной с постоянной средней плотностью вещества (и излучения), которая определяется с помощью бумажно-карандашной операции (термин П.У.Бриджмена) деления массы вещества в некоторой области Вселенной на объем этой области, в результате которой средняя плотность различных областей нивелируется, и с дальнейшим увеличением размеров областей, вплоть до наибольшей единой области — Метагалактики, дает среднюю плотность вещества (и излучения) во Вселенной. «Физической реализацией» такой модели представляется Вселенная, в которой все вещество равномерно распределено по её объему.
>
> Я предлагаю иную идеальную модель однородной и изотропной Вселенной (подробнее см. [1], гл. V, VIII и XV), в которой вводится понятие гравитационной сферы Вселенной, и все вещество «отодвинуто» к горизонту и «локализовано» на гравитационной сфере $r = R$, а в пространстве внутри сферы вещества нет. В реальной Вселенной, наблюдаемой с Земли, даже если мы возьмем r большим (скажем, предельное расстояние, доступное среднему телескопу), то все еще $r \ll R$, и m — масса вещества внутри сферы радиуса r все еще много меньше массы Вселенной, т.е. $m \ll M$ и основная часть вещества Вселенной, определяющая динамику Вселенной в целом, все еще находится дальше наших наблюдательных возможностей. Отсюда один шаг к представлению идеальной Вселенной — пренебрегаем m и отодвигаем M к горизонту (к Гравитационной сфере). В качестве «физической реализации» пространства такой модели можно считать любую область космического пространства, достаточно далеко удаленную от массивных тел и пространство которой можно считать однородным и изотропным, например, межгалактическое пространство, пространство солнечной системы вдали от Солнца и планет или даже на поверхности Земли при очень грубых опытах (например, в быту).

4. Гравитация во Вселенной. Динамика Вселенной.

Отметим еще силу, называемую далее *хаббловской*, действующую на пробное тело массы m', находящееся на расстоянии r от точки наблюдения,

$$F_H = m' r H^2 \tag{13}$$

которая получается из (6), с учетом (9), при $r \ll R$, а также *хаббловское* ускорение свободного падения (для $r \ll R$)

$$\ddot{r} = rH^2 \tag{14}$$

> Выражение для скорости (8) и ускорения (14) наводят на мысль о некоторой аналогии с вращением в механике. Действительно, если некоторое тело вращается с угловой скоростью ω, то линейная скорость точки на расстоянии r от оси вращения равна $V = r\omega$, а центробежное ускорение — $V = r\omega^2$. При этом скорость перпендикулярна радиусу, а ускорение направлено по радиусу. Глядя на (8) и (14), возникает вопрос, а нельзя ли постоянную Хаббла H интерпретировать как «угловую скорость» и соответственно хаббловскую скорость и хаббловское ускорение как линейную скорость и центробежное ускорение? Но при этом и линейная скорость и центробежное ускорение направлены по радиусу относительно точки наблюдения, и кроме того, «угловая скорость» не является вектором.
>
> Но мы и не утверждаем, что речь идет об обычном вращении (с двумя полюсами = осью вращения). Короче говоря, наша мысль сводится к следующему: нельзя ли расширение Вселенной интерпретировать как «вращение с одним полюсом» («скалярное вращение»?), т.е. не является ли наша Вселенная гравитационным аналогом монополя Дирака ?

Попробуем далее ответить на следующий вопрос: существует ли граница гравитационного воздействия тела массы m на другие тела? На пробное тело массы m' действует ньютоновская сила притяжения $F_N = -\dfrac{Gmm'}{r^2}$. Кроме того, на него действует хаббловская сила $F_H = m'rH^2$. Суммарная сила

$$F = F_H + F_N = m'rH^2 - \frac{Gmm'}{r^2} \tag{15}$$

При малых r преобладает ньютоновский член, и в системе отсчета, связанной с телом m, сила F является силой притяжения. С увеличением r ньютоновская сила уменьшается, а хаббловская растет, и при некотором r сила F равна нулю, а при дальнейшем увеличении r сила F становится силой отталкивания.

Естественно считать границей гравитационного воздействия тела m расстояние, при котором сила F равна нулю. Это расстояние, т.е. радиус, при котором ньютоновская сила равна хаббловской (по абсолютной величине), назовем «*антигравитационным радиусом тела* m». Его значение находим из (15) при $F = 0$

$$r_{ag} = \left(\frac{Gm}{H^2}\right)^{1/3} \tag{16}$$

> Если продолжить аналогию с вращением в механике, т.е. интерпретировать H как угловую скорость ω, то (16) дает радиус круговой орбиты спутника, вращающегося с угловой скоростью ω вокруг центрального тела массы m. Действительно, из равенства гравитационного и центробежного ускорений $\dfrac{Gm}{r^2} = r\omega^2$ имеем $r = \left(\dfrac{Gm}{\omega^2}\right)^{1/3}$.

Думается, что наличие антигравитационного радиуса может объяснить наблюдаемую иерархию вещества во Вселенной. Вычислим антигравитационный радиус типичной звезды (Солнца, $m \approx 2\cdot 10^{30}$ *кг*), шарового звездного скопления ($\approx 10^5$ звезд, $m \approx 2\cdot 10^{35}$ *кг*) и галактики (Галактики, $m \approx 2\cdot 10^{41}$ *кг*). Из (8) находим соответственно — 112 *пс* (парсек), 5.2 *кпс* (килопарсек), 632 *кпс*. Антигравитационный радиус звезды является неким характерным расстоянием для звездных скоплений, антигравитационный радиус звездного скопления — характерным расстоянием для галактик (диаметр Галактики ≈ 40 *кпс*), антигравитационный радиус галактики — характерным расстоянием для скоплений галактик (расстояние до туманности Андромеды, члена Местной Группы, куда входит и наша Галактика, ≈ 690 *кпс*) и т.д. Конечность антигравитационного радиуса т.е. ограниченность радиуса гравитационного притяжения массивных тел во Вселенной, исключает так называемый гравитационный парадокс, имеющий место в ньютоновской Вселенной. По-видимому, антигравитационный радиус играл определенную роль и в формировании галактик, скоплений галактик и пр.

Отметим еще, что наша Вселенная является <u>*уникальным*</u> объектом, у которого антигравитационный радиус равен гравитационному

$$r_{ag} = r_g = R$$

Заметим, что это обстоятельство существенно укрепляет нашу уверенность,что мы на верном пути, ибо наша Вселенная, по своей сути, и должна быть уникальным объектом, где все «крайности» сходятся. В частности, массу

$$M = \frac{c^3}{GH} \tag{17}$$

— единственную, для которой гравитационный и антигравитационный радиусы равны, можно считать массой Вселенной, даже если бы у нас не было (а они есть!) никаких других соображений, кроме уникальности Вселенной.

Представляет интерес и еще одно значение радиуса, связанного с телом m. Рассмотрим свободную частицу, находящуюся на расстоянии r от тела m. С одной стороны, свободная частица падает на тело m со скоростью $V_1 = \sqrt{\frac{2Gm}{r}}$ (ньютоновская скорость свободного падения), с другой стороны, удаляется от него с хаббловской скоростью $V_2 = rH$. Расстояние, при котором эти скорости равны по абсолютной величине, т.е. расстояние, при котором в системе отсчета тела m частица находится «в покое» (это утверждение следует понимать лишь в определенном смысле «свободного падения») равно

$$r_0 = \left(\frac{2Gm}{H^2}\right)^{1/3} = 2^{1/3} r_{ag} \tag{18}$$

Легко видеть, что означает r_0: если массу m равномерно распределить внутри сферы радиуса r_0, то плотность равнялась бы эйнштейновской критической плотности

$$\rho_{\text{кр}} = \frac{3H^2}{8\pi G}. \tag{19}$$

Наличие этих двух радиусов (r_{ag} и r_0) позволяет выявить некоторые особенности динамики однородной и изотропной Вселенной. При этом даже не требуется составлять и решать космологические уравнения (для предварительного, качественного анализа). И что особенно замечательно, при этом совершенно прозрачна роль средней плотности вещества в динамике Вселенной.

Итак, пусть Вселенная однородна и изотропна с плотностью вещества равной ρ. В этом случае, как мы уже отмечали, динамика Вселенной в целом полностью определяется динамикой произвольной сферы, выделенной во Вселенной.

Пусть сфера радиуса r с центром в произвольной точке содержит внутри себя вещество массы m. В ньютоновской механике движение частицы на поверхности сферы целиком определяется гравитационным воздействием массы m (вещества внутри сферы) и не зависит от вещества вне сферы, но в нашем случае её движение определяется также гравитационным воздействием Вселенной (её гравитационной сферы). Может показаться, что здесь имеется противоречие: с одной стороны, движение частицы не зависит от вещества вне сферы, с другой стороны, определяется гравитационным воздействием Вселенной, т.е. зависит от вещества именно вне сферы. На самом деле, первое утверждение относится только к ньютоновской гравитации, на основании которой мы описываем влияние выделенной сферы на движение частицы. При нашем подходе вещество вне сферы также влияет на движение частицы (и в этом наш подход отличается от ньютоновского), но это влияние мы относим к гравитационной сфере Вселенной и поэтому можем считать, что вещество вне сферы, но близкое к ней, не влияет на движение частицы на поверхности сферы.

> Ничего необычного в данном предложении нет поскольку гравитационная сфера и точка наблюдения абсолютно симметричны. Дело в том, что гравитационная сфера является <u>*собственно сферой*</u> только относительно точки наблюдения (с системе отсчета “наблюдателя”), тогда как в собственной системе отсчета она является такой же точкой, как и точка наблюдения. Это нетрудно понять, если, следуя Эйнштейну, считать пространство

> Вселенной трехмерной сферой и если точка наблюдения — это один полюс, то гравитационная сфера — другой, противоположный. Сказанное, возможно, легче понять по аналогии с двумерной сферой. Пусть пространство Вселенной — двумерная сфера, скажем, поверхность глобуса. Точка наблюдения находится на северном полюсе (для определенности), R — длина меридиана, гравитационная сфера — южный полюс. И тогда любая сфера (окружность) радиуса r с центром в точке наблюдения (северный полюс) и содержащая внутри себя массу m, является также сферой (окружностью) радиуса $R - r$ с центром на гравитационной сфере (южный полюс), содержащей в себе массу $M - m$. Причем гравитационное воздействие второй сферы, в соответствии с теорией Ньютона, не зависит от того, как распределена масса внутри сферы, можно считать, что она вся находится в центре, т.е. на гравитационной сфере.

И тогда для $r_g \ll r \ll R$, где r_g — гравитационный радиус массы m, а R — радиус Вселенной (5), скорость частицы на поверхности выделенной сферы равна

$$V = rH - \left(\frac{2Gm}{r}\right)^{1/2} \tag{20}$$

или, имея в виду, что $m = \frac{4\pi}{3} r^3 \rho$,

$$V = rH - \left(2G\frac{4\pi}{3}\rho r^2\right)^{1/2} = rH\left(1 - \sqrt{\Omega}\right), \tag{21}$$

где

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_{\text{кр}}} \tag{22}$$

— относительная плотность (отнесенная к критической плотности (19)). Найдем также ускорение частицы

$$\ddot{r} = rH^2 - \frac{Gm}{r^2} = rH^2\left(1 - \frac{1}{2}\Omega\right). \tag{23}$$

Сравнивая (21) и (23), видим, что

$$\begin{array}{llll} \text{при} \quad \Omega < 1 & \Rightarrow & V > 0, & \ddot{r} > 0 \\ 1 < \Omega < 2 & \Rightarrow & V < 0, & \ddot{r} > 0 \\ 2 < \Omega & \Rightarrow & V < 0, & \ddot{r} < 0 \end{array} \tag{24}$$

В первом случае сфера расширяется ($V > 0$), во втором и третьем — сжимается ($V < 0$). Ввиду произвольности в выборе сферы эти выводы распространяются на всю Вселенную. Условия (24) имеют совершенно ясный смысл. Если плотность ρ меньше критической, то притяжение вещества внутри сферы оказывается недостаточным, чтобы противостоять притяжению остального вещества Вселенной (гравитационной сферы), и произвольная выделенная сфера, а следовательно и Вселенная, расширяется. При этом никакого «первого толчка», каковым обычно считают т.н. «большой взрыв», не требуется. Если же плотность ρ больше критической, то наоборот, притяжение вещества внутри выделенной сферы оказывается больше притяжения вещества Вселенной, и выделенная сфера сжимается.

Условия типа (24) (сходные по сути, но отличные по форме) получены и в ОТО (А.А.Фридман, 1922-24 гг) и в ньютоновской теории тяготения (Э.Милн, И.Мак-Кри, 1934-35 гг). И в том и в другом случае есть такое утверждение: если в настоящий момент эволюции Вселенной относительная плотность $\Omega_0 > 1$, то наблюдаемое в данный момент расширение Вселенной должно в будущем смениться сжатием.

Из условий (24) видно, что переход от расширения ($V > 0$) к сжатию ($V < 0$) мог бы произойти в единственном случае, когда параметр Ω переходит, увеличиваясь, через значение $\Omega = 1$. То обстоятельство, что $\Omega_0 > 1$, а $\Omega < 1$ или $\Omega = 1$, само по себе еще не является в принципе невозможным, но невозможно другое, а именно: скорость V не может, непрерывно уменьшаясь, изменить свой знак при переходе через $V = 0$, т.к. ускорение при этом остается положительным. (Заметим попутно, что обратный переход — от сжатия к расширению — условия (24) допускают (сверхновые?!).) Если $\Omega = 1$ в принципе возможно, то это должно быть заведомо «особой точкой». В [4] я показал, что и в модели Фридмана следует тот же вывод, т.е. значение плотности, равной критической ($\Omega = 1$) соответствует сингулярному состоянию Вселенной, а так называемая "плоская Вселенная" невозможна.

Разумеется, все приведенные выше выводы относятся к средней плотности во Вселенной в предположении, что Вселенная строго однородна. Если же по некоторым причинам имеют место локальные флуктуации плотности при неизменной средней плотности во Вселенной, то появятся области локально сжимающиеся или локально расширяющиеся независимо от глобального расширения или сжатия Вселенной. Действительно, при малых r («малых» в смысле $r < r_{ag}$, где r_{ag} — антигравитационный радиус массы вещества внутри сферы радиуса r) преобладает ньютоновское притяжение, и вещество «концентрируется» в объекты (кластеры), положение которых в иерархии вещества Вселенной (звезды, звездные скопления, галактики, …) зависит от масштаба явления. При больших r $(r > r_{ag})$ преобладающим является хаббловское отталкивание, и сформированные (или формирующиеся) объекты удаляются друг от друга. Именно этим можно объяснить наличие во Вселенной скоплений галактик с плотностью выше средней (и выше критической) и пустот с плотностью ниже средней. При этом, если имеет место некое периодическое распределение флуктуаций плотности (волна флуктуаций), то становится понятной ячеистая структура крупномасштабного распределения вещества во Вселенной.

5. Антигравитация во Вселенной. Гравитационный вакуум.

Притяжение гравитационной сферы, действующее на любую частицу во Вселенной, как бы растягивает эту частицу равномерно во все стороны, что можно интерпретировать как существование отрицательного давления в каждой точке пространства Вселенной, последнее, в свою очередь, можно интерпретировать как плотность энергии или, разделив на c^2, — плотность массы. Сказанное позволяет предположить (постулировать) существование некоего «вещества» с отрицательной плотностью, равномерно распределенного во Вселенной наряду с обычным веществом. Я назвал это «вещество» *гравитационным вакуумом*.

Обращаю внимание, что гравитационный вакуум — это просто иная форма представления гравитационной сферы Вселенной, т.е. я предлагаю два альтернативных, но абсолютно равноправных подхода к моделированию постньютоновской Вселенной: Вселенная с обычным веществом и гравитационной сферой или Вселенная с обычным веществом и гравитационным вакуумом

Очевидные свойства гравитационного вакуума следуют из определения:

1. **вакуум обладает отрицательной плотностью массы (энергии)** (обратите внимание, что плотность вакуума определяется как первичное понятие, тогда как масса (энергия) вакуума — как вторичное);
2. **вакуум гравитационно не взаимодействует сам с собой**;
3. **Взаимодействие вакуума и вещества** определяется законом тяготения (4) для внешнего пространства ($r > r_g$)

$$F = -\frac{Gmm'r}{\left(r^2 - r_g^2\right)^{3/2}}, \quad r > r_g. \tag{25}$$

Здесь m' — масса (обычная) пробной частицы, находящейся на расстоянии r от точки наблюдения , m — масса вакуума внутри сферы радиуса r с центром в точке наблюдения, $r_g = \dfrac{G|m|}{c^2}$ — гравитационный радиус массы вакуума внутри сферы. Учитывая, что масса вакуума m отрицательна, сила F в (25) положительна (напомню, что я не пользуюсь векторными обозначениями, полагая положительное направление всегда от точки наблюдения), т.е. вакуум действует на обычную материю как сила отталкивания, зависящая только от расстояния от точки наблюдения.

Как я отметил выше, гравитационный вакуум вводится как иная интерпретация гравитационной сферы, поэтому представляется естественным положить полную массу гравитационного вакуума внутри гравитационной сферы равной по модулю массе гравитационной сферы, т.е. массе Вселенной. Зная массу Вселенной и радиус гравитационной сферы (см. (9)), находим плотность гравитационного вакуума

$$\rho_{вак} = -\frac{M}{\frac{4\pi}{3}R^3} = -\frac{3\frac{c^3}{GH}}{4\pi\left(\frac{c}{H}\right)^3} = -\frac{3H^2}{4\pi G} = -2\rho_{кр}. \tag{26}$$

Таким образом, плотность гравитационного вакуума постоянна и не зависит от r (Строго говоря, это не так. Плотность вакуума $\rho = const$ (26) имеет место только при $r \ll R$ ([1], гл.IV и V), что практически достаточно для реальных задач, т.к. наши сегодняшние наблюдательные возможности проникновения вглубь Вселенной еще не вышли за пределы области $r \ll R$)

Вычисляя массу вакуума в выражении для силы (25)

$$m = \frac{4\pi}{3}r^3\rho = \frac{4\pi}{3}r^3\left(-\frac{3H^2}{4\pi G}\right) = -\frac{r^3H^2}{G} ,$$

находим силу

$$F = \frac{m'r^4H^2}{\left(r^2 - r_g^2\right)^{3/2}} \approx m'rH^2 = F_H , \quad r_g \ll r \ll R$$

естественно, совпадающую с хаббловской (13). С другой стороны, хаббловскую силу можно представить в виде

$$\vec{F}_H = m'\vec{r}H^2 = -m'\,\mathrm{grad}\left(-\frac{1}{2}r^2H^2\right),$$

и тогда величину

$$\varphi_{вак} = -\frac{1}{2}r^2H^2$$

естественно интерпретировать как гравитационный потенциал вакуума. Последний, как легко проверить непосредственно, удовлетворяет уравнению Пуассона

$$\Delta\varphi_{вак} = 4\pi G\rho_{вак}$$

Здесь $\Delta = \nabla\cdot\nabla$ — оператор Лапласа, $\rho_{вак}$ — плотность вакуума (26). Имея в виду уравнение Пуассона для вещества $\Delta\varphi = 4\pi G\rho$, а также линейность уравнения, окончательно гравитационное уравнение Пуассона принимает вид

$$\Delta\varphi = 4\pi G\left(\rho + \rho_{вак}\right). \tag{27}$$

Это гравитационное уравнение Пуассона, описывающее взаимодействие вещества и вакуума в доступной нам части Вселенной ($r \ll R$) предоставляет еще одну, чисто классическую возможность, изучения гравитации во Вселенной, опираясь на пуассоновскую теорию потенциала.

6. Инерция вещества и гравитационный вакуум. Принцип Маха.

Отмечу еще, что гравитационный вакуум, *так же как вещество*, расширяется или сжимается в зависимости от плотности вещества (без кавычек! Подробнее см. [1], гл. V), т.е. и для вакуума имеют место соотношения, подобные (24),

$$\begin{array}{llll} \text{при} & \Omega < 1 & \Rightarrow & V_{вак} > 0, \quad \ddot{r}_{вак} < 0 \\ & 1 < \Omega < 2 & \Rightarrow & V_{вак} < 0, \quad \ddot{r}_{вак} < 0 \\ & 2 < \Omega & \Rightarrow & V_{вак} < 0, \quad \ddot{r}_{вак} > 0 \end{array} \tag{28}$$

Сравнивая (28) и (24), видим, что вещество и вакуум расширяются или сжимаются одновременно (скорости вещества и вакуума всегда одинаковы по направлению). Что касается ускорений, то они всегда противоположно направлены и одинаковы по модулю (см. [1], гл. V). Последнее позволяет допустить, что вещество и вакуум всегда обладают свойствами, полученными из динамики Вселенной, т.е. вакуум движется так же, как вещество, но его ускорение всегда противоположно ускорению вещества, тогда, возможно, силы инерции — это реакция вакуума на движение вещества? Это действительно так, и мы это строго (в рамках нашей модели) докажем ниже.

При этом мы покажем даже больше сказанного, а именно докажем (*докажем*, а не постулируем !), что так называемый принцип Маха имеет место, т.е. силы инерции действительно обязаны своим появлением гравитационному воздействию далеких масс во Вселенной, или иначе говоря, силы инерции суть не что иное как гравитационные силы, а следовательно, имеет место и так называемый принцип эквивалентности (один из основных принципов при создании ОТО) и, тем самым, появляется надежда закрыть вопрос о «таинственном» совпадении тяжелой и инертной масс, т.е. мы имеем не совпадение, а одну единственную массу. Сама возможность доказательства принципа Маха (и следовательно, принципа эквивалентности) в нашей модели обязана тому счастливому свойству модели, что в ней всю Вселенную можно заменить её гравитационной сферой.

Гравитационный потенциал Вселенной (гравитационной сферы) в точке наблюдения равен (см. (3) при $r = 0$)

$$\varphi = -c^2 \tag{29}$$

т.е. гравитационный потенциал Вселенной равен константе (а не бесконечности, как в ньютоновской Вселенной) и следовательно, Вселенная в точке наблюдения ($r = 0$) не создает гравитационное (силовое) поле. Но это верно до тех пор, пока Вселенная изотропна относительно точки наблюдения. И как только точка наблюдения начинает двигаться с ускорением, так изотропия Вселенной относительно точки наблюдения нарушается, что приводит к появлению гравитационного поля в системе отсчета, связанной с точкой наблюдения.

Рассмотрим некоторую (нештрихованную) инерциальную систему отсчета Σ, и пусть в этой системе задан кватерный гравитационный потенциал

$$\Phi = \varphi^* + \vec{\mathbf{A}}. \tag{30}$$

Пусть далее инерциальная система Σ' (штрихованная) движется относительно Σ со скоростью $\vec{\mathbf{V}}$, и пусть в этой системе тот же гравитационный потенциал

$$\Phi' = \varphi'^* + \vec{\mathbf{A}}'.$$

тогда (см. [1], гл. III)

$$\Phi' = e^{\frac{1}{2}\vec{\psi}^*}\,\Phi\; e^{\frac{1}{2}\vec{\psi}^*}.$$

где $\vec{\psi}$ определяется из

$$\operatorname{th}\vec{\psi} = \frac{\vec{\mathbf{V}}}{c}.$$

Проделав все вычисления (см. [1], гл. II, III), получаем

$$\begin{aligned}
&\varphi' = \varphi\,\operatorname{ch}\psi - A_{\parallel}\operatorname{sh}\psi = \frac{\varphi - A_{\parallel}\dfrac{V}{c}}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \quad A_{\parallel} = |\vec{\mathbf{A}}_{\parallel}| \\
&\vec{\mathbf{A}}'_{\parallel} = \vec{\mathbf{A}}_{\parallel}\operatorname{ch}\psi - \varphi\,\operatorname{sh}\psi\,\vec{\mathbf{1}} = \frac{\vec{\mathbf{A}}_{\parallel} - \varphi\dfrac{\vec{\mathbf{V}}}{c}}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \\
&\vec{\mathbf{A}}'_{\perp} = \vec{\mathbf{A}}_{\perp}
\end{aligned} \tag{31}$$

где $\vec{\mathbf{A}}'_{\parallel}$ и $\vec{\mathbf{A}}_{\parallel}$ — составляющие векторного потенциала, параллельные вектору скорости, а $\vec{\mathbf{A}}'_{\perp}$ и $\vec{\mathbf{A}}_{\perp}$ — составляющие векторного потенциала, перпендикулярные вектору скорости.

Пусть теперь тело массы m' движется относительно некоторой инерциальной системы (которую полагаем неподвижной) во Вселенной со скоростью $\vec{\mathbf{V}}$. Гравитационный потенциал Вселенной в этой системе равен (см. (29))

$$\varphi = -c^2$$

или, сравнивая с (30),

$$\varphi = -c^2\,, \quad \vec{\mathbf{A}} = 0 \quad (\vec{\mathbf{A}}_{\parallel} = 0,\ \vec{\mathbf{A}}_{\perp} = 0)$$

И тогда в системе отсчета, связанной с телом m' (подвижной), гравитационный потенциал Вселенной находим в соответствии с (31)

$$\begin{aligned} \varphi' &= \frac{-c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \\ \vec{\mathbf{A}}'_{\parallel} &= \frac{c\vec{\mathbf{V}}}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}\,, \quad \vec{\mathbf{A}}'_{\perp} = 0. \end{aligned} \tag{32}$$

Первое соотношение (32) дает возможность определить и полную энергию тела $E' = m'\varphi'$ (здесь потенциальную, поэтому отрицательную)

$$E' = \frac{-m'c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}$$

т.е. энергия тела зависит от скорости. В [1], гл. IX показано, что для подобного взаимодействия имеет место теорема о вириале (релятивистская) $E_{кин} = -E_{пот}$, из которой следует

$$E'_{кин} = \frac{m'c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}$$

Последнее можно также интерпретировать как зависимость массы от скорости.

Полагаем для простоты $V \ll c$, тогда (32) можно переписать

$$\begin{aligned} \varphi' &= -c^2 - \frac{1}{2}V^2 \\ \vec{\mathbf{A}}'_{\parallel} &= c\vec{\mathbf{V}}, \quad \vec{\mathbf{A}}'_{\perp} = 0 \end{aligned} \tag{33}$$

Напряженность гравитационного поля в системе отсчета, связанной с телом m' (подвижной), находим из уравнений для гравитационного поля (см. [1], гл. III, (III-15))

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{E}}' &= -\frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial t}(c\vec{\mathbf{V}}) - \mathrm{grad}(-c^2 - \frac{1}{2}V^2) \\ \vec{\mathbf{H}}' &= \mathrm{rot}(c\vec{\mathbf{V}}) \end{aligned} \tag{34}$$

Если скорость $\vec{\mathbf{V}}$ явно зависит от времени и не зависит (явно) от координат, то

$$\vec{\mathbf{E}}' = -\frac{\partial}{\partial t}\vec{\mathbf{V}} = -\frac{d}{dt}\vec{\mathbf{V}} = -\dot{\vec{\mathbf{V}}} \tag{35}$$

Если же скорость $\vec{\mathbf{V}}$ явно зависит от координат и не зависит от времени, то

$$\vec{\mathbf{E}}' = \mathrm{grad}(\frac{1}{2}V^2) \tag{36}$$

Но как известно, движение частицы в неподвижной системе отсчета описывается уравнением Лагранжа (Эйлера)

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \vec{\mathbf{V}}}\right) = \mathrm{grad}\,L$$

с лагранжианом $L = \frac{1}{2}m'V^2$, таким образом

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial}{\partial \vec{\mathbf{V}}}(\frac{1}{2}m'V^2)\right) = \mathrm{grad}(\frac{1}{2}m'V^2) = m'\dot{\vec{\mathbf{V}}}\,,$$

что при переходе к подвижной системе отсчета дает в (36)

$$\mathrm{grad}(\frac{1}{2}V^2) = -\dot{\vec{\mathbf{V}}}$$

(т.к. $V \ll c$, то время полагаем одинаковым как в неподвижной, так и в подвижной системах отсчета, и точкой обозначаем полную производную по времени в той и другой системах отсчета).

Таким образом, и (35) и (36) дают

$$\vec{\mathbf{E}}' = -\dot{\vec{\mathbf{V}}} \tag{37}$$

И, наконец, из (37) в соответствии с (III-28) ([1], гл. III) находим

$$\vec{\mathbf{F}}' = m'\vec{\mathbf{E}}' = -m'\dot{\vec{\mathbf{V}}}$$

Если скорость $\vec{\mathbf{V}}$ — постоянна, то $\vec{\mathbf{F}}' = 0$, и в системе отсчета, связанной с телом m', никакие силы не возникают. Если же $\vec{\mathbf{V}}$ переменна, т.е. тело m' движется с ускорением, то в системе отсчета, связанной с телом m', возникает сила, известная нам как сила инерции. Если к тому же некоторая частица массы m'' движется со скоростью $\vec{\mathbf{v}}$ относительно подвижной системы отсчета, то (см. III-28)

$$\vec{\mathbf{F}}' = -m''\dot{\vec{\mathbf{V}}} + \frac{m''}{c}[\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{H}}'] \tag{38}$$

где $\vec{\mathbf{H}}'$ — напряженность гравимагнитного поля (34).

В качестве примера рассмотрим точку на поверхности тела, равномерно вращающегося с угловой скоростью $\vec{\boldsymbol{\omega}}$ относительно некоторой инерциальной системы. Линейная скорость этой точки относительно инерциальной системы $\vec{\mathbf{V}} = \vec{\boldsymbol{\omega}} \times \vec{\mathbf{r}}$, где $\vec{\mathbf{r}}$ — радиус-вектор из некоторой точки на оси вращения. Тогда из (33) в системе отсчета, связанной с рассматриваемой точкой на поверхности тела, имеем

$$\vec{\mathbf{A}}'_{\parallel} = c\vec{\boldsymbol{\omega}} \times \vec{\mathbf{r}},$$

откуда в соответствии с (37) и (34) находим

$$\vec{\mathbf{E}}' = -\dot{\vec{\mathbf{V}}} = -\vec{\boldsymbol{\omega}} \times \dot{\vec{\mathbf{r}}} = -\vec{\boldsymbol{\omega}} \times \vec{\mathbf{V}} = \vec{\boldsymbol{\omega}} \times [\vec{\mathbf{r}} \times \vec{\boldsymbol{\omega}}]$$

$$\vec{\mathbf{H}}' = c \cdot \mathrm{rot}[\vec{\boldsymbol{\omega}} \times \vec{\mathbf{r}}] = 2c\vec{\boldsymbol{\omega}}$$

И если частица массы m'' движется относительно точки поверхности со скоростью $\vec{\mathbf{v}}$, то в соответствии с (38),

$$\vec{\mathbf{F}}' = m''\vec{\mathbf{E}}' + \frac{m''}{c}[\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{H}}'] = m''\vec{\boldsymbol{\omega}} \times [\vec{\mathbf{r}} \times \vec{\boldsymbol{\omega}}] + 2m''[\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\boldsymbol{\omega}}] ,$$

т.е. в системе отсчета, связанной с точкой поверхности, возникают силы, известые нам как центробежная и кориолисова.

Таким образом, силы инерции (38) и гравитационные силы (4) получаются из одних и тех же уравнений поля, для одной и той же массы, что и доказывает и принцип Маха, и принцип эквивалентности, и тождественность инертной и гравитационной массы.

7. Заключение. Темная энергия.

Так уж случилось, что я познакомился с проблемой «темной энергии» лишь немногим более года назад (данная статья датируется 2005 г.) по статье А.Д.Чернина “Физический вакуум и космическая анти-гравитация” (http://www.astronet.ru/db/msg/1174484 см. также УФН 171 11 (2001)). Предоставляю слово А.Д.Чернину:

«…в 1998-99 гг. две группы астрономов-наблюдателей открыли космическую анти-гравитацию и космический вакуум. В работе участвовало большое число астрономов (около ста в общей сложности), одной группой руководил Адам Райес, другой — Сол Перлмуттер; исследования продолжаются и сейчас, они приобретают все больший размах, в них включаются все новые и новые специалисты-наблюдатели, а за ними и теоретики.

Главный смысл новейших открытий в космологии таков. В наблюдаемой Вселенной доминирует физический вакуум; по плотности энергии он превосходит все ‘обычные’ формы космической материи вместе взятые. Вакуум создает космическую анти-гравитацию, которая управляет динамикой космологического расширения в современную эпоху. Из-за этого космологическое расширение ускоряется, а 4-мерное пространство-время мира становится тем временем статическим.»

Схема применения фридмановской теории в этом вопросе такова: Положительная космологическая постоянная Λ порождает положительную (постоянную) плотность энергии вакуума

$$\rho_{\mathrm{v}} = \frac{c^4\Lambda}{8\pi G},$$

которая, в силу уравнения состояния $P = -\rho$, порождает отрицательное давление вакуума

$$P_{\mathrm{v}} = -\rho_{\mathrm{v}}.$$

Согласно фридмановской теории, тяготение создается не только плотностью среды, но и её давлением в комбинации $\rho + 3P$. Вакуум вызывает анти-гравитацию именно потому, что его эффективная гравитирующая энергия

$$\rho_G = \rho_{\mathrm{v}} + 3P_{\mathrm{v}} = -2\rho_{\mathrm{v}},$$

отрицательна при положительной плотности. При этом, наблюдаемая особенность в светимости далеких сверхновых, рассматривается как бесспорное доказательство ускоренного расширения Вселенной, существования темной энергии и вакуума, дающего основной вклад в массу Вселенной, а также необходимости введения космологической постоянной в уравнения Фридмана (Эйнштейна).

Нет, я не отвергаю эти выводы, я просто показываю, что есть несомненно более простое и естественное объяснение и темной энергии, и её роли в ускоренном расширении Вселенной. “Эффективная гравитирующая энергия” (темная энергия) ρ_G, предлагаемая в качестве единственного объяснения ускоренного расширения Вселенной, совпадает с предлагаемым мной гравитационным вакуумом вплоть до деталей и “механизма” ускорения. Более того, интерпретация удаления далеких галактик как свободное падение этих галактик на гравитационную сферу Вселенной вообще не требует никакого другого объяснения ускорения кроме гравитационного, известного еще Галилею. Единственное принципиальное отличие состоит в том, что в нашей модели темная энергия (т.е. гравитационный вакуум) не вносит вклад в массу Вселенной. (И даже это отличие, на самом деле, не является принципиальным, просто я и А.Д.Чернин рассматриваем проблему с разных сторон. Я — от "известной" массы Вселенной к гравитационному вакууму, и для меня проблемы вклада вакуума в массу Вселенной просто нет. А.Д.Чернин — по найденной оценке плотности темной энергии и других известных видов материи оценивает массу Вселенной, и для него, вывод о значительном вкладе темной энергии является естественным.)

И наконец, коль скоро речь все время идет о расширении Вселенной, напомню замечание, на которое вы, возможно, не обратили должного внимания (см. комментарий к космологическому красному смещению с. 4): наблюдаемое “разбегание” далеких галактик еще не означает расширение “Вселенной в целом” — это “внутреннее” явление во Вселенной, не обязательно связанное с её расширением как целого. Расширяется ли “Вселенная в целом”? И что это значит? Наша модель не может пока ответить на эти вопросы. Ответ дает только теория относительности.

Ссылки:

[1] . Натуральная философия. Книга: http://yadi.sk/d/xIZAI9HLHBxo7

[2] . Расширение Вселенной => локальная физика. Статья: http://yadi.sk/d/LlqhEf-_HBuKr

[3] “Специальные“ теории относительности. Статья: http://yadi.sk/d/JaBkfpP8HBuPv

[4] Космологическая модель Фридмана (новая интерпретация). Статья: http://yadi.sk/d/bMtccbLIHBuqp

[5] Теория относительности, новые идеи, новые подходы. Статья: http://yadi.sk/d/OUJwyeTpHBuUo

В статье рассматриваются только оригинальные идеи автора, поэтому список литературы включает только работы автора.

*   *   *