Темная материя и темная энергия

Гладуш В.Д.
ДНУ, кафедра теоретической физики

Дорогие коллеги! Мы живем в эпоху революций, кризисов и перемен. Мне бы хотелось затронуть революцию (кризис) в области фундаментальной физики, который усматривается в настоящее время. Он, где-то, аналогичен кризису в естествознании начала 19 века, который затронут в работах известных классиков. И вот тогда уже был заложен фундамент нынешнего кризиса.

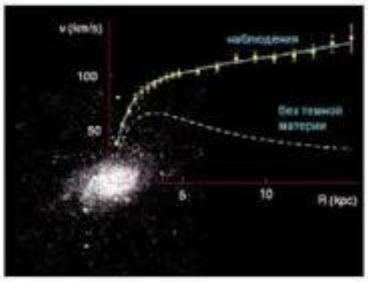
В то время зарождались и в настоящее время сформировались и нашли широкое применение две великие теории: квантовая теория и общая теория относительности. Эти теории были привнесены в наш научный мир на плечах титанов. Так, квантовая теория была построена в трудах Шредингера, Гейзенберга, Дирака и др., в то время, как ОТО была построена в работах одного (?) Эйнштейна! Триумфальное шествие этих теорий по нашей Земле омрачается небольшим обстоятельством. Они, пока, не поддаются объединению. Здесь встречаются ряд трудностей, главная из которых — это нелинейность ОТО (а также то, что это теория со связями).

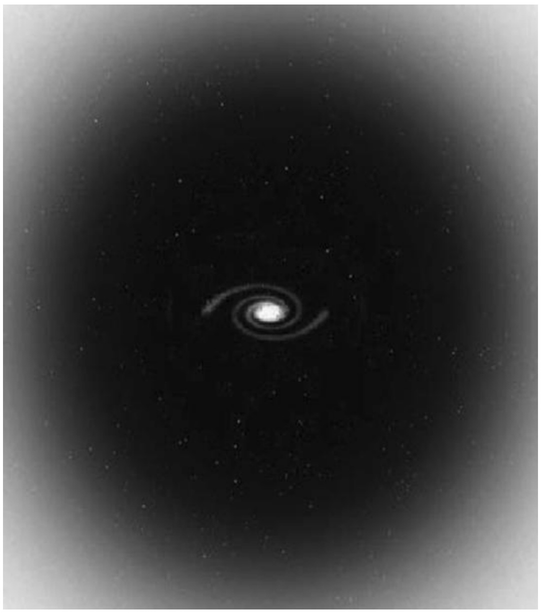
Канонический подход, уравнение Уиллера-Девитта, петлевые переменные, суперсимметрия, супергравитация, браные сценарии, М-браны – каких только изощрённых схем не было изобретено, а воз и ныне там!

Некоторые скептики утверждают, что эти теории в принципе не могут быть в одной семье. Назревали первые ростки кризиса.

I. Темная материя

В это время новый кризис надвигался с другой стороны. В 1933 году швейцарский астроном Цвикки измерил радиальные скорости восьми галактик в скоплении Кома (созвездие Волосы Вероники). Оно включает в себя тысячи галактик, которые движутся вокруг общего центра. Он обнаружил, что для устойчивости скопления приходится предположить, что его полная масса в десятки раз больше, чем масса входящих в него звёзд. Вскоре это же обнаружилось для других галактик. Особенный интерес вызвала туманность Андромеды — скорость вращения звёзд вокруг её центра не уменьшалась, как предсказывала небесная механика, обратно пропорционально $\boxed{\sqrt{R}}$ (где R — расстояние до центра), а оставалась почти постоянной.





Это могло означать, что галактика на всём своём протяжении содержит значительную массу невидимого вещества (**галактическое гало**). Основное количество материи, присутствующей в этой области Вселенной, остается по каким-то причинам невидимой и недоступной для прямых наблюдений, проявляя себя только гравитационно, то есть только как масса. Термин «**темная материя**» (ТМ) появился впервые в работах Цвики.

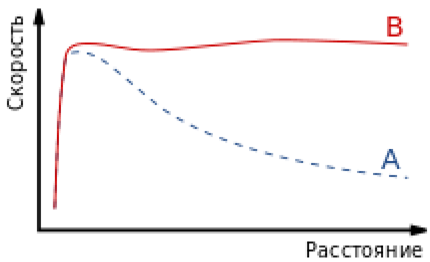
Здесь мы кратко затронем феноменологическое описание ТМ, которое проявляется наиболее ярко в существовании галактического гало ТМ

I.1.Феноменологическая модель гало ТМ

Скорость вращения ***V*** объекта по устойчивой кеплеровской орбите с радиусом ***r*** вокруг Галактики может быть найдена по формуле

$$\boxed{V = \sqrt{\frac{GM}{r}},} \tag{I.1}$$

где G – гравитационная постоянная. Таким образом, если ***r*** лежит вне видимой части Галактики, то для скоростей вращения должно быть $\boxed{V \propto 1/\sqrt{r}}$.



Это противоречит данным наблюдательной астрономии, для которой $V = const$. Для нашей солнечной системы эта скорость равна V≈220 км/с. Указанное несоответствие объясняется наличием ТМ, которая распределена в виде темного галактического гало. Она никак не проявляется, кроме как своим гравитационным воздействием на звезды и другие объекты.

Для построения модели вполне уместно использовать ньютоновскую теорию гравитации, поскольку v/c<<1 и $\varphi/c^2 << 1$. Предположим, что ТМ распределена в Галактике сферически- симметричным образом. Тогда масса ТМ в шаре радиуса *r* будет равной $M = M(r)$. Здесь *r* расстояние от центра Галактики. Таким образом, пренебрегая видимой материей из (1), находим

$$\boxed{M(r) = \frac{V^2}{G} r.} \tag{I.2}$$

С другой стороны, масса шара ТМ равна

$$\boxed{M(r) = 4\pi \int_{r_0}^{r} r^2 \rho_{DM}(r)\, dr,} \tag{I.3}$$

где $\rho_{DM}(r)$ – плотность ТМ, r_0. – нижняя граница плато на кривой вращения. Из этих двух соотношений, дифференцируя, для плотности ТМ получаемт

$$\boxed{\rho_{DM}(r) = \frac{V^2}{4\pi G r^2}, \quad r > r_0.} \tag{I.4}$$

В рамках ньютоновской гравитации, гравитационное поле φ, создаваемое такой ТМ, описывается решением уравнение Пуассона

$$\boxed{\Delta\varphi = 4\pi G \rho_{DM}.} \tag{I.5}$$

В сферически-симметричном случае, для плотности ТМ (1.4), получаем следующий потенциал

$$\varphi = V^2 \ln r - \frac{C_1}{r} + C_2.$$

Второе слагаемое соответствует центральному источнику. Мы ищем гравитационный потенциал, создаваемый облаком ТМ при $r > r_0$. Поэтому можно положить C_1=0, а постоянную C_2 выбрать так, чтобы $\varphi(r_0) = 0$. Таким образом, предположение сферически-симметричного распределения ТМ и наблюдательный факт наличия плато на кривых вращения приводят к следующему ньютоновскому потенциалу

$$\boxed{\varphi = V^2 \ln \frac{r}{r_0}, \quad r > r_0.} \tag{I.6}$$

Рассмотрим условия равновесия ТМ. Для этого следует ввести предположение о природе ТМ. Простейшее предположение сводится к рассмотрению идеального газа нерелятивистских частиц с плотностью ρ и давлением P. Тогда условие равновесия сферического облака ТМ имеет вид

$$\boxed{\frac{dP}{dr} = -\rho_{DM} \frac{d\varphi}{dr}.} \tag{I.7}$$

Используя выражение для плотности (4), находим необходимое давление ТМ

$$\boxed{P = \frac{V^4}{8\pi G r^2}, \quad r > r_0.} \tag{I.8}$$

Откуда приходим к линейному уравнению состояния ТМ $P = \frac{1}{2}V^2\rho_{DM}$. Верхняя граница облака ТМ может быть оценена из условия $\rho_{DM} \geq \rho_{GDM}$, где ρ_{GDM} – плотность межгалактической ТМ. Отсюда для радиуса облака ТМ получаем

$$r_G = \frac{V}{2\sqrt{\pi G \rho_{GDM}}}.$$

Рассмотренная феноменологическая модель известна как «**сингулярная изотермическая сфера**». Однако данная модель является неудовлетворительной применительно к галактическому гало ТМ. Если мы имеем дело с холодной ТМ, которая, по определению, никак и не с чем не взаимодействует, кроме как гравитационным образом, то откуда возьмется давление, необходимое для устойчивости гало? Таким образом, здесь для обеспечения устойчивости, необходимо ввести такую макроскопическую величину (наблюдаемую!), как давление ТМ, смысл которого не ясен и которое никак не проявляется при наблюдениях. Поэтому ниже развивается микроскопический, кинетический подход к частицам гало ТМ, как к статистической совокупности малых бесстолкновительных частиц, которые движутся в собственном самосогласованном гравитационном поле.

I.2.Статистическая модель гало ТМ

Рассмотрим теперь в качестве ТМ статистическую совокупность бесстолкновительных нерелятивистских частиц. По предположению, это нейтральные, бесспиновые, массивные частицы очень малых размеров, которые могут взаимодействовать только гравитационным образом. Сечение рассеяния этих частиц настолько мало, а длина свободного пробега настолько велика, что они свободно пролетают сквозь планеты и звезды, не претерпевая каких-либо изменений.

В качестве кандидата таких частиц, можно рассмотреть элементарные черные дыры (ЧД) с массой порядка планковской массы, которые являются возможными реликтовыми остатками квантового испарении первичных ЧД. Стабильные элементарные ЧД могут играть роль максимально тяжелых элементарных частиц и, возможно, частиц ТМ (остатки первичных ЧД, максимоны, фридмоны и др. (Зельдович и Новиков, Хокинг, Фролов и Новиков)). Элементарные ЧД характеризуются экстремально малым сечением рассеяния порядка 10^{-66} cm² [5]. Заметим, что частицы с энергией большей энергии связи с галактикой, в том числе релятивистские, не образуют связанных с галактическим гало состояний и испаряются. Поэтому, мы рассматриваем только холодную ТМ, как совокупность нерелятивистских частиц.

Применим к такой статистической совокупности частиц классический кинетический подход. Плотность числа частиц равна: $\boxed{f(\mathbf{r},\mathbf{v})=N\psi(\mathbf{r},\mathbf{v},t)}$, где $\psi(\mathbf{r},\mathbf{v},t)$ – функция распределения, $\mathbf{v}$ – скорость, $\mathbf{r}$ – радиус-вектор частиц, N – общее число частиц. При этом, плотность массы ТМ равна

$$\boxed{\rho_{DM}(\vec{r},t) = m\int \mathrm{f}(\vec{\mathrm{r}},\vec{\mathrm{v}},\mathrm{t})\mathrm{d}\vec{\mathrm{v}},} \tag{I.9}$$

где m – масса частиц. Функция распределения подчиняется бесстолкновительному кинетическому уравнению

$$\frac{\partial\psi}{\partial t} + \left(\vec{v}\cdot\frac{\partial\psi}{\partial\vec{r}}\right) + \left(\vec{\mathrm{F}}\cdot\frac{\partial\psi}{\partial\vec{v}}\right) = 0. \tag{I.10}$$

Здесь $\vec{\mathrm{F}} = -\nabla\varphi$ – гравитационная сила, φ – гравитационный потенциал. Компоненты тензора "напряжений" ищутся по формуле

$$\boxed{\mathrm{T}_{\alpha\beta} = m\int f\, v_\alpha v_\beta d\vec{v}.} \tag{I.11}$$

Для равновесных конфигураций функция распределения и плотность массы не зависит от времени $\Psi=\Psi_0(\mathbf{r},\mathbf{v})$, $\rho_0=\rho_0(\mathbf{r})$, и уравнения для функции распределения принимает вид

$$\boxed{\left(\vec{v}\cdot\frac{\partial\psi_0}{\partial\vec{r}}\right) - \left(\frac{\partial\varphi_0}{\partial\vec{r}}\cdot\frac{\partial\psi_0}{\partial\vec{v}}\right) = 0.} \tag{I.12}$$

где φ_0 – самосогласованный потенциал гравитационного поля, удовлетворяющий уравнению Пуассона: $\boxed{\Delta\varphi_0 = 4\pi G\rho_0}$. Анизотропные давления описываются формулами:

$$P_r = m\int f_0 v_r^2 d\vec{v}, \tag{I.13а}$$

$$P_t = T_{\theta\theta} = T_{\alpha\alpha} = \frac{1}{2}m\int f_0 v_\perp^2 d\vec{v}. \tag{I.13б}$$

Заметим, что величины P_r и P_t, строго говоря, это не радиальное и тангенциальное давления, а соответствующие **дисперсии скоростей**!

В изотропном случае функция распределения может зависеть только от энергии $\Psi_0=\Psi_0(E)$, в этом случае мы имеем изотропное давление P_{r}=P_{t}=P_0. Тогда плотность массы и давление вычисляются по формулам

$$\boxed{\begin{aligned}\rho_0 &= 4\pi\sqrt{2}m\int_{\varphi_0}^{\infty} f_0(E)(E-\varphi_0)^{1/2}\,dE, &(I.14a)\\ P_0 &= \frac{8\pi\sqrt{2}}{3}m\int_{\varphi_0}^{\infty} f_0(E)(E-\varphi_0)^{3/2}\,dE. &(I.14б)\end{aligned}}$$

Дифференцируя равенство в (I.14б) и сравнивая результат с формулой (I.14а), получаем известное условие гидродинамического равновесия

$$\boxed{\frac{dP_0}{dr} = -\rho_0\frac{d\varphi_0}{dr},} \qquad (I.15)$$

которое было использовано выше, при рассмотрении условия равновесия газового облака ТМ в феноменологической картине. Таким образом, из уравнений (I.14) и (I.15) вытекает известная гидродинамическая аналогия, позволяющая упростить и объяснить последующие выводы. Здесь дисперсии скоростей проявляется, как давление в феноменологической теории.

Поскольку конфигурация **стационарна**, то мы можем применить равновесную функцию распределения. Т.е. рассмотрим частное решение кинетического уравнения **— распределение Максвелла- Больцмана**

$$\boxed{\psi(\vec{r},\vec{v}) = Ae^{-E/\theta} = \frac{1}{J}\left(\frac{m}{2\pi\theta}\right)^{3/2} exp\left(-\frac{m}{\theta}\left(\frac{\vec{v}^2}{2}+\varphi_0(\vec{r})\right)\right),} \qquad (I.16)$$

где

$$J = \int exp\left(-\frac{m}{\theta}\varphi_0(\vec{r})\right)d\vec{r}, \qquad (I.17)$$

$\theta=kT$ − модуль канонического распределения. Функция $\psi(\boldsymbol{r},\boldsymbol{v})$ − это плотность вероятности определенного состояния частицы. Тогда средняя плотность числа частиц в пространстве с координатами $\{\boldsymbol{r},\boldsymbol{v}\}$ есть $f(\boldsymbol{r},\boldsymbol{v})=N\psi(\boldsymbol{r},\boldsymbol{v})$, где N − общее число частиц системы так, что

$$\int f(\vec{r},\vec{v})d\vec{v}d\vec{r} = N.$$

Плотность массы ТМ в облаке

$$\rho_{DM}(\vec{r}) = m\int f(\vec{r},\vec{v})\,d\vec{v} = \frac{mN}{J}\left(\frac{m}{2\pi\theta}\right)^{3/2}\int exp\left(-\frac{m}{\theta}\left(\frac{\vec{v}^2}{2}+\varphi_0(\vec{r})\right)\right)d\vec{v}, \qquad (I.18)$$

где m – масса частицы ТМ. Полная масса облака: M=m N. Отсюда получаем

$$\boxed{\rho_{DM}(\vec{r}) = \frac{M}{J} e^{-m\varphi_0/\theta}.} \tag{I.19}$$

Тогда уравнение **Пуассона** для самосогласованного сферически-симметричного гравитационного поля φ_0 принимает вид нелинейного уравнения **Лиувилля**

$$\Delta\varphi = \frac{d^2\varphi_0}{dr^2} + \frac{2}{r}\frac{d\varphi_0}{dr} = 4\pi G \frac{M}{J} e^{-m\varphi_0/\theta}. \tag{I.20}$$

Это уравнение имеет следующее частное решение

$$\varphi_0 = \varphi_{DM} = \frac{2\theta}{m} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right). \tag{I.21}$$

При этом модуль канонического распределения должен быть равным

$$\theta = 2\pi m G r_0^2 \frac{M}{J}. \tag{I.22}$$

Потенциал гравитационного поля (I.21) аналогичен гравитационному потенциалу (I.6) феноменологической модели. Пользуясь гидродинамической аналогией и сравнивая эти потенциалы, приходим к формуле для модуля распределения $\theta = \frac{mV^2}{2}$. Приведенные выше выражения для модуля θ и формулы (22) и (23) приводят к соотношению для полной массы облака ТМ

$$M_{DM} = \frac{JV^2}{4\pi G r_0^2}. \tag{I.24}$$

Отсюда, учитывая формулы (I.19), (I.21), для плотности ТМ получаем выражение (I.4), что соответствует феноменологической картине и указывает на согласованность подходов.

Таким образом, в качестве модели галактического гало можно принять бесстолкновительную систему очень малых, очень тяжелых нейтральных, бесспиновых частиц ТМ, которые взаимодействуют только гравитационным образом. Частицы ТМ подчинены равновесному распределению Максвелла-Больцмана.

Заметим, что по современным наблюдательным данным ТМ составляет ~ 30% от всей материи Вселенной.

II. Темная энергия

Темная энергия (ТЭ) – невидимая космическая среда, физическая природа и микроскопическая структура которой неизвестны. О её существовании стало известно 1998-1999 гг. в результате астрономических наблюдений на больших космологических расстояниях, вблизи горизонта мира (премия Шао по астрономии за 2006 год и Нобелевскую премию по физике за 2011 год). Riess A G et al. *Astron. J.* **116** 1009 (1998); Perlmutter S et al. *Astrophys. J.* **517** 565 (1999).

II.1 Интерпретация темной энергии

Для однородной и изотропной пылевой конфигурации рассмотрим поведение пылевого шара, изучаю эволюцию граничной сферы, сопутствующей пыли. В этом случае можно использовать ньтоновский подход. Тогда ОТО, если говорить о ней на языке ньютоновской механики, утверждает, что наряду с ньютоновским всемирным тяготением

$$\boxed{F_N=-GM/R^2,} \qquad \text{(II.1)}$$

в природе существует всемирное антитяготение с линейной зависимостью силы от расстояния

$$\boxed{F_{DE}=c^2\Lambda R/3,} \qquad \text{(II.2)}$$

где G – гравитационная постоянная, Λ – космологическая постоянная. Сила отталкивания не зависит от масс тел и создаётся не ими, а невидимой идеально однородной универсальной космической средой, заполняющей всё пространство с постоянной плотностью. Эта среда отождествляется с открытой астрономами ТЭ. Плотность ТЭ выражается через космологическую постоянную

$$\boxed{\rho_{DE}=c^2\Lambda/8\pi G.} \qquad \text{(II.3)}$$

Плотность ТЭ $\boxed{\rho_{DE}=(0{,}721\pm0{,}025)\times10^{-29}\text{ г/ см}^3\ .}$ В наблюдаемой Вселенной ТЭ доминирует: на неё приходится 72% полной энергии/массы мира.

В 1965г. Глинер предложил интерпретацию космологической постоянной, в духе вакуумоподобной антигравитирующей среды с постоянной плотностью. Эту работу, впоследствии, высоко оценил Зельдович. К настоящему времени она стала общепринятой и лежит в основе современной стандартной космологической модели (ΛCDM-модель, где CDM – Cold Dark Matter). Хотя за рубежом эта работа оценена иначе!

К понятию вакуумоподобной среды можно подойти, рассматривая тензор энергии-импульса, который фигурирует в уравнениях Эйнштейна

$$R^{\mu}_{\nu}-\frac{1}{2}R\delta^{\mu}_{\nu}=\frac{8\pi\kappa}{c^4}T^{\mu}_{\nu}\ . \qquad \text{(II.4)}$$

Определим вакуумоподобное состояние материи, как состояние, для которого все системы отсчета и все направления эквивалентны. Следовательно, движение и покой относительно такой среды неразличимы. Это значит, что любой времениподобный или пространственноподобный вектор является собственным вектором тензора энергии-импульса

$$\boxed{T^{\mu}_{\nu}\xi^{\nu} = \lambda\xi^{\mu},} \quad \Rightarrow \boxed{\left(T^{\mu}_{\nu} - \lambda\delta^{\mu}_{\nu}\right)\xi^{\nu}} = 0 \quad \forall\xi^{\mu} \in TM\ . \tag{II.5}$$

Отсюда следует, что $T^{\mu}_{\nu} \sim \delta^{\mu}_{\nu}$, т.е.

$$R^{\mu}_{\nu} - \frac{1}{2}R\delta^{\mu}_{\nu} = \frac{8\pi\kappa}{c^4}T^{\mu}_{\nu} = \Lambda\delta^{\mu}_{\nu}, \tag{II.6}$$

где Λ коэффициент пропорциональности. Таким образом, мы заключаем, что вакуумоподобное состояние характеризуются плотностью энергии

$$T^{0}_{0} = \boxed{\varepsilon = \frac{c^4}{8\pi\kappa}\Lambda} \tag{II.7}$$

и уравнением состояния

$$\boxed{p = -\varepsilon\,.}$$

Поскольку «эффективная гравитирующая плотность энергии» определяется формулой $\varepsilon_{eff}=\varepsilon+3P$, то с учетом уравнения состояния получаем

$$\boxed{\varepsilon_{eff} = -2\varepsilon < 0.} \tag{II.8}$$

Отрицательная эффективная плотность энергии означает «отрицательное» тяготение, которое стремиться удалить тела друг от друга. В настоящее время эта энергия называется ТЭ. Коэффициент пропорциональности – это и есть знаменитая космологическая постоянная, которую связывают с плотностью энергии вакуума и обуславливает всемирное отталкивание (антитяготение).

Гипотеза об универсальном всемирном космическом отталкивании, выдвинута Эйнштейном в 1917, когда он, впервые, применил ОТО к задаче о мире как целом. Он ввел космологическую постоянную, чтобы ввести отталкивания для построения статической космологической модели. Однако, после построения Фридманом динамической космологической модели, а также после астрономических исследований Хаббла, в которых теория расширяющейся Вселенной получила прямое наблюдательное подтверждение, Эйнштейн потерял интерес к идее всемирного отталкивания. Он предложил забыть о космологической постоянной, пока в её пользу не появятся «достаточные эмпирические основания». В старых изданиях «Теории поля» Ландау и Лифшица можно почесть «… нет никаких настоятельных и убедительных оснований… для такого видоизменения уравнений тяготения». По словам Гинзбурга «Ландау даже слышать не хотел о Λ-члене, но добиться от него причины такой позиции мне не удалось». Резко против космологической постоянной выступал Паули.

Однако, со временем, ситуация начинает меняться. Интерес к космологической постоянной возникал в разные годы в связи с проблемой возраста мира. По оценкам, основанных на данных Хаббла, её возраст около 2 млрд лет, что меньше геологического возраста Земли (около 7-9 млрд лет)! Позднее ее возраст оценивался в 7-9 млрд лет, что, тем не менее, меньше возраста старых шаровых скоплений (по оценкам астрономов 12-15 млрд лет).

Ситуация резко изменилась после наблюдений двух независимых групп Райса и Перлмуттера, которые изучали далекие сверхновые типа (Ia). Сверхновые типа Ia возникают тогда, когда белый карлик в системе двойной звезды отбирает у своего партнера путем аккреции достаточно вещества, чтобы значение его массы приблизилось к пределу Чандрасекара (~4,6 $M_{\odot}$) — максимальной возможной массе, сдерживаемой давлением вырожденных электронов. Когда это случается, белый карлик переходит в неустойчивое состояние, а рост температуры и плотности делает возможным преобразование углерода и кислорода в ^{56}Ni, запускающее термоядерный взрыв, который можно увидеть с расстояний порядка нескольких тысяч мегапарсеков. Масса взорвавшейся звезды всегда близка к пределу Чандрасекара, так что абсолютная светимость таких взрывов варьируется в небольшом диапазоне, что делает их идеальными индикаторами расстояний. Сверхновые Ia служат в качестве стандартных свечей. Они очень яркие; пиковая голубая абсолютная звездная величина в среднем составляет около — 19,2, что вполне сопоставимо с примерной абсолютной звездной величиной —20,3 нашей собственной Галактики.

В результате наблюдений было обнаружено, что космологическое расширение происходит с положительным ускорением – скорости разбегающихся галактик возрастают со временем.

II.2 Геометрическая трактовка

Предыдущее рассмотрение указывает нам на универсальный и постоянный характер антигравитации. В свою очередь вакуумоподобное состояние среды не связано ни с уравнениями гравитационного поля, ни со свойствами материи и видом тензора-энергии импульса материи, а являются проявлением фундаментальных свойств самой геометрии пространства-времени.

Действительно, рассмотрим геометрический подход и введем следующие условия изотропии геометрии пространства-времени.

Определение. Пространство в данной точке $p \in M$ изотропно, если для его тензора кривизны $R^{\mu\nu}_{\rho\sigma}$, любой бивектор $F^{\rho\sigma}$ является собственным, т.е

$$\boxed{R^{\mu\nu}_{\rho\sigma} F^{\rho\sigma} = 2KF^{\mu\nu},} \qquad \forall F^{\rho\sigma}, \qquad F^{\rho\sigma} = -F^{\sigma\rho} \tag{II.9}$$

Отсюда вытекает

$$\boxed{\left[R^{\mu\nu}_{\rho\sigma} - K(\delta^{\mu}_{\rho}\delta^{\nu}_{\sigma} - \delta^{\mu}_{\sigma}\delta^{\nu}_{\rho})\right] F^{\rho\sigma} = 0,} \qquad \forall F^{\rho\sigma}. \tag{II.10}$$

Таким образом, общее выражение для тензора кривизны, изотропного во всех точках пространства-времени, имеет вид

$$\boxed{R_{\mu\nu\rho\sigma} = K(g_{\mu\rho} g_{\nu\sigma} - g_{\mu\sigma} g_{\nu\rho}).} \tag{II.11}$$

Из тождеств Бианки следует, что $K = const$ для всего пространства-времени. Далее из приведенной формулы следует

$$R_{\nu\sigma} = 3Kg_{\nu\sigma} \quad \Rightarrow \quad R = 12K. \tag{II.12}$$

Для тензора Эйнштейна, аналогично, получаем

$$\boxed{G_{\nu\sigma} = R_{\nu\sigma} - \frac{1}{2} R g_{\nu\sigma} = -3Kg_{\nu\sigma}.} \tag{II.13}$$

Сравнивая это соотношение с уравнением Эйнштейна с космологической постоянной, мы заключаем, что

$$\Lambda = -3K \quad \Rightarrow \quad \boxed{K = -\frac{\Lambda}{3}.} \tag{II.14}$$

Далее, тензор конформной кривизны Вейля для рассматриваемого пространства

$$C_{\mu\nu\rho\sigma} = R_{\mu\nu\rho\sigma} - \frac{1}{2}(R_{\mu\rho} g_{\nu\sigma} - R_{\mu\sigma} g_{\nu\rho} - R_{\nu\rho} g_{\mu\sigma} + R_{\nu\sigma} g_{\mu\rho}) + \frac{R}{6}(g_{\mu\rho} g_{\nu\sigma} - g_{\mu\sigma} g_{\nu\rho}). \tag{II.15}$$

оказывается, равным нулю

$$\boxed{C_{\mu\nu\rho\sigma} = 0.} \tag{II.16}$$

Это означает, что рассматриваемое пространство является конформно плоским, т.е. его метрика имеет вид

$$g_{\mu\nu} = \Omega^2 \eta_{\mu\nu}, \tag{II.17}$$

где $\eta_{\mu\nu}$ – метрика плоского пространства-времени, $\Omega = \Omega(x^\mu)$ – конформный множитель.

Далее, гауссова кривизна K поверхности с координатами $\{x^1, x^2\}$ равна

$$K = \frac{R_{1212}}{g_{11}g_{22} - g_{12}^2}. \tag{II.18}$$

Таким образом, мы имеем пространство, которое по всем двумерным направлениям имеет одинаковую кривизну, т.е. мы имеем дело с пространством постоянной кривизны $K = const$. Итак

$$R_{\mu\nu\rho\sigma} = K(g_{\mu\rho}g_{\nu\sigma} - g_{\mu\sigma}g_{\nu\rho}). \tag{II.19}$$

Здесь

$$K = \frac{1}{a^2} = -\frac{\Lambda}{3}, \tag{II.20}$$

где $a^2 = -3/\Lambda$ – радиус кривизны пространства.

Вычисления показывают, что метрику можно представить в виде

$$ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu = \Omega^2 \eta_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu = \frac{\eta_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu}{(1-(K/4)u^2)^2}, \qquad u^2 = \eta_{\mu\nu}x^\mu x^\nu \tag{II.21}$$

Введя координаты

$$r = u\cosh\chi, \quad x^0 = u\sinh\chi \tag{II.22}$$

Метрику можно записать в форме

$$ds^2 = \frac{dx^0 - dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)}{(1-(K/4)u^2)^2} = \frac{u^2 d\chi^2 - du^2 - u^2\cos^2\chi(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)}{(1-(K/4)u^2)^2}. \tag{II.23}$$

Замена

$$R = \frac{u}{1 - Ku^2/4} = \frac{u}{1 + \Lambda u^2/12}. \qquad \text{(II.24)}$$

приводит полученную метрику к стандартной форме метрики де Ситтера

$$\boxed{ds^2 = R^2 d\chi^2 - \frac{dR^2}{1 - \frac{\Lambda}{3}R^2} - R^2 \cos^2\chi (d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2).} \qquad \text{(II.25)}$$

Итак, мы видим, что так называемая ТЭ – это проявление свойств геометрии пространства де Ситтера. Как мы уже говорили в наблюдаемой Вселенной ТЭ доминирует: на неё приходится 72% полной энергии/массы мира.

Главное различие ТМ от ТЭ, что ТМ может фрагментироваться, т.е. образовывать скопления и участвовать в образовании скоплений. В то время, как ТЭ характеризуется однородным и изотропным распределением, имеет универсальный геометрический характер. Можно сказать, что это дополнительная полевая степень свободы пространственно-временной геометрии, не зависящая от привычной для нас гравитации.

Процентное содержание различного рода вещества в нашей Вселенной можно представить в виде таблицы.

Обычное видимое вещество	5%
Нейтрино	0,3-3%
Барионная ТМ	4-5%
Небарионная ТМ	20-25%
ТЭ	65-70%

Заметим, что надежды на открытие массивного нейтрино не решили проблему ТЭ.

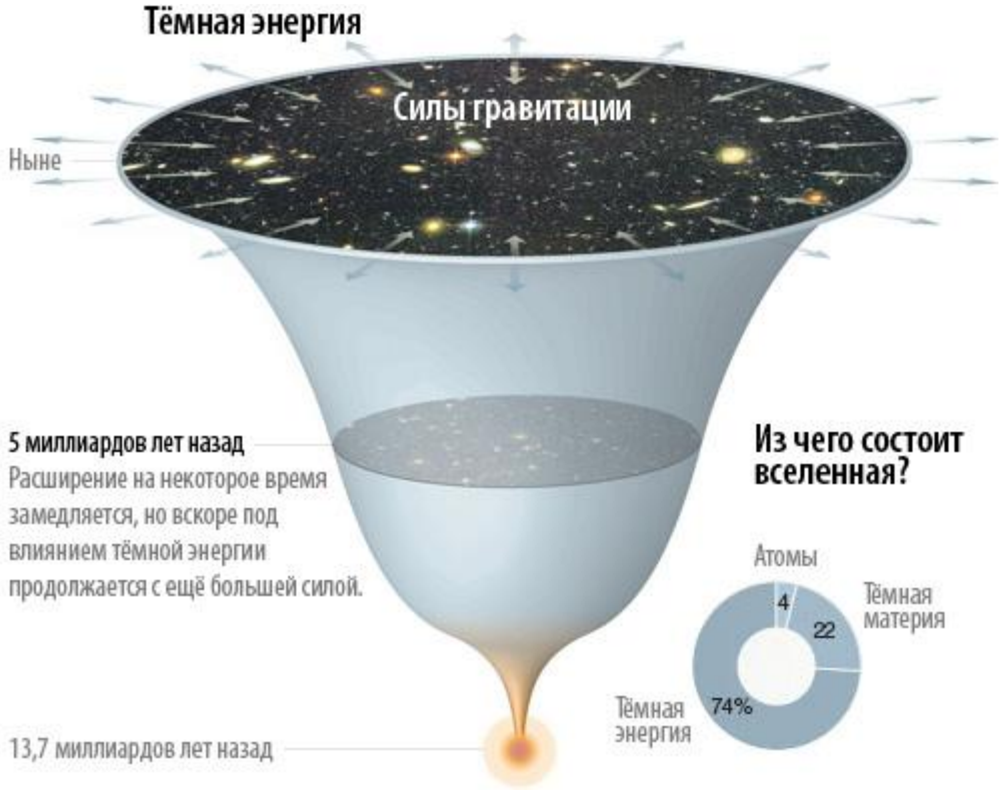
Мы видим, что подавляющее содержание нашей Вселенной это среда, суть и формы которой нам неизвестны.

Заключение. Революция или Кризис

Подведем итоги. Многие факторы указывают нам, что налицо революция в современной физике! Центр тяжести современных фундаментальных исследований перемещается из лабораторий в космос. А характер исследования меняется от планируемого эксперимента в земной лаборатории к наблюдению за непредсказуемыми событиями в космосе. Не трансформируется ли наш современный способ познания, в конце концов, к созерцательному методу? Т.е. вперед в прошлое, снова к старому, доброму методу древних греков!

Отметим, что существуют различные теории ТЭ. Есть теория фантомной энергии скалярного поля, где кинетическая часть входит в лагранжиан с неправильным знаком (квинтэссенция). Справедливость этой гипотезы сильно зависит от природы тёмной энергии. Если она верна, то при некоторых соотношениях констант теории, Вселенная будет ускоренно расширяться, и величина масштабного фактора станет равной бесконечности за конечное время.

И вот тут всплывает **зловещий лик** ТЭ, который в конце концов порождает большой разрыв!



Если гипотеза «Большого разрыва» верна, то, по мере увеличения скорости расширения, расстояние до горизонта событий, — т. е. той части Вселенной, которая удаляется от наблюдателя со скоростью света — будет уменьшаться. Все, что находится за горизонтом, недоступно наблюдению, потому что скорость света является пределом для любых взаимодействий.

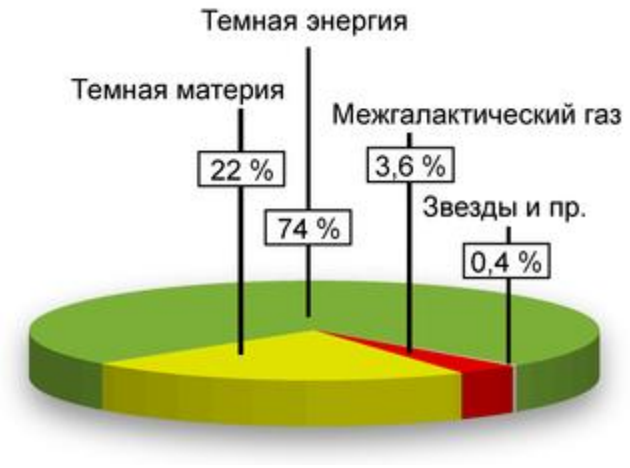
И в этом случае конец Вселенной (Большой разрыв) наступит приблизительно через 22 млрд лет.

- За миллиард лет до Большого разрыва распадутся скопления галактик.
- Примерно за 60 млн лет до Большого разрыва гравитация станет слишком слабой, чтобы удерживать галактики. Распадётся и наша галактика.
- За 3 месяца до Большого разрыва Солнечная система станет гравитационно несвязанной.
- За 30 минут до Большого разрыва разрушится Земля.
- За 10^{-9} с (1 нс) до Большого разрыва разрушатся атомы.

В момент Большого взрыва, перестают работать известные нам законы физики и дальнейшую судьбу Вселенной предсказать невозможно.

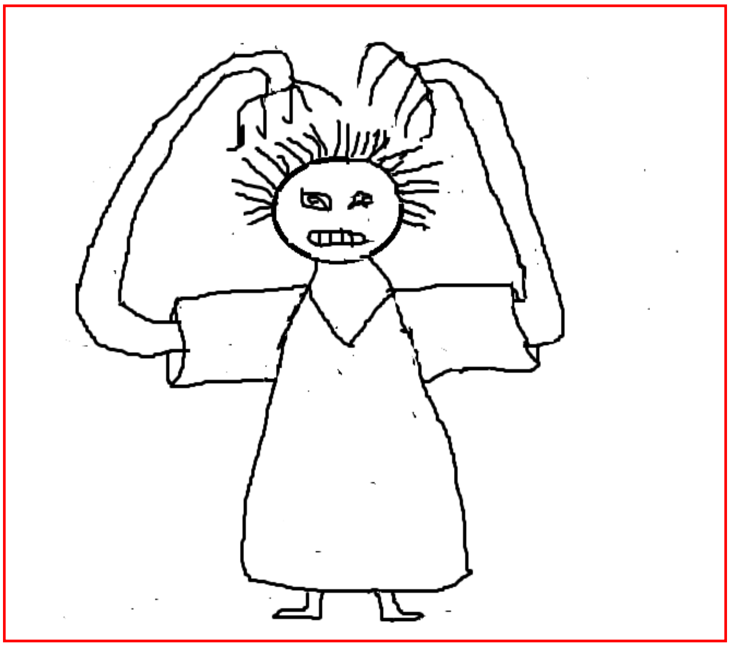
Но это всего лишь один из возможных сценариев развития Вселенной! Но кризис познания остается!

С другой стороны, современное состояние фундаментальных исследований приобретают характер кризиса. Налицо, остается следующий факт. Можно, фигурально, считать, что нами познано только 4% составляющих мира, а 96% остаются не познанными! И это обнаружилось совсем недавно!



И вот, в этот момент, хочется, подобно античному герою, рвать на себе рубаху и посыпать свою голову пеплом и сокрушенно причитать:

"Я знаю только то, что ничего не знаю!".



Говорят, что так, в минуту депрессии, воскликнул Демокрит.

Всего доброго!

Спасибо за внимание!