

Упругая динамика пространства-времени: единый механизм кривых вращения галактик и ускоренного расширения Вселенной (Единая Теория Циклической Квантовой Вселенной. ЕТЦКВ)

Владимир Владимирович Никитин

Построена количественная модель, в которой пространство-время рассматривается как релятивистская упругая среда с вязкоупругими свойствами. Модификация гравитации, необходимая для объяснения плоских кривых вращения галактик, и ускоренное расширение Вселенной возникают как два проявления динамики одной и той же среды. Модель строится из общеквариантного лагранжиана без фиксированной фоновой метрики. В ней имеются два глобальных параметра: характерная длина $\lambda_{\text{QEN}} = 3,42$ кпк и безразмерный параметр нелинейной регуляризации $\gamma = 0,68$. Эти параметры фиксируются по одной эталонной галактике (NGC 3198) и затем без подгонки применяются ко всей выборке из 147 галактик SPARC, давая среднее $\chi^2/\nu = 1,14$. Информационный критерий BIC превосходит стандартную модель Λ CDM более чем на 1200 единиц. Ускоренное расширение интерпретируется как релаксация остаточных напряжений среды после космологического фазового перехода; соответствующая плотность энергии $E_0 \sim 2,5 \times 10^{-3}$ эВ/см³ согласуется с наблюдаемой $\Omega_\Lambda \approx 0,7$. Сформулированы три бинарных фальсифицируемых предсказания, отличающих модель от Λ CDM и MOND.

““latex

Введение

Проблема тёмного сектора

Стандартная космологическая модель Λ CDM постулирует, что около 27% массы-энергии Вселенной приходится на тёмную материю и около 68% на тёмную энергию. Несмотря на десятилетия прямых поисков, ни одна частица тёмной материи не была обнаружена, а природа тёмной энергии остаётся неизвестной. В галактической динамике это проявляется в том, что для объяснения плоских кривых вращения спиральных галактик требуется введение индивидуально подбираемых профилей тёмных гало. Модель теряет предсказательную силу на галактическом масштабе.

Альтернативный подход

В настоящей работе мы принимаем, что пространство-время является физической средой — релятивистской упругой сплошной средой (QEN). Гравитация интерпретируется как упругий отклик этой среды на присутствие материи. Ускоренное расширение объясняется релаксацией остаточных напряжений, возникших при космологическом фазовом переходе. В рамках этой парадигмы тёмная материя и тёмная энергия становятся избыточными: их эффекты автоматически воспроизводятся динамикой упругой среды.

Цель работы — построить количественную модель, которая одновременно описывает кривые вращения галактик и космологическое расширение с минимальным числом параметров.

Аксиоматика и лагранжиан

Основные положения

Теория строится на пяти аксиомах:

1. **Динамическая субстанциальность.** Пространство-время — физическая среда, описываемая метрикой $g_{\mu\nu}$ и внутренними степенями свободы ϕ^A . Равновесие определяется динамически.
2. **Эмерджентная квантовая природа.** Квантовые явления являются эмерджентными; в данной работе используется классический предел.
3. **Гравитация как упругий отклик.** Уравнения выводятся из вариационного принципа. В пределе слабых полей теория воспроизводит ОТО.
4. **Время как параметр эволюции.** Время не является независимым полем.
5. **Отсутствие сингулярностей.** Упругие свойства предотвращают коллапс; эволюция циклическая.

Лагранжиан упругой среды

Полное действие:

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{R}{16\pi G} + L_{\text{elast}} + L_{\text{matter}} \right],$$

где R — скалярная кривизна. Среда описывается тремя скалярными полями $\phi^A(x)$, $A=1,2,3$, через материальную метрику

$$B^{AB} = g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi^A \partial_\nu \phi^B.$$

Изотропная среда характеризуется тремя инвариантами

$$b_1 = \text{tr}(B), b_2 = \text{tr}(B^2), b_3 = \det(B).$$

В равновесии $b_1=3, b_2=3, b_3=1$. Упругий лагранжиан

$$L_{\text{elast}} = -E_0 F(b_1, b_2, b_3),$$

где безразмерная функция

$$F = \frac{1}{2} \alpha (b_1 - 3)^2 + (b_2 - 3)^2 + \alpha (b_3 - 1)^2 + \delta (b_1 - 3)(b_3 - 1)$$

Здесь α, δ, κ — безразмерные параметры. Функция F и её первые производные обращаются в нуль в равновесии, обеспечивая нулевой тензор энергии-импульса в вакууме.

Модифицированное уравнение Пуассона и формула для скорости вращения

Вывод модифицированного уравнения

Варьирование действия по метрике даёт тензор энергии-импульса упругой среды. В линейном приближении вокруг вакуума (метрика Минковского, $\phi^A = x^A$) возмущения полей ψ^A и метрики $h_{\mu\nu}$ связаны соотношением

$$\delta b_1 = \delta b_3 = \Theta, \delta b_2 = 2\Theta, \Theta = 2\partial_i \psi_i - h_{ii}.$$

Линеаризованный тензор энергии-импульса

$$\delta T_{\mu\nu}^{(\text{elast})} = -2E_0 K \Theta \dot{H}_{\mu\nu},$$

где $\dot{H}_{\mu\nu} = \text{diag}(0, 1, 1, 1)$, а эффективный модуль

$$K = 4\alpha + 8 + 2\delta.$$

Важно, что $\delta T_{00}^{(\text{elast})} = 0$. Модификация гравитации возникает не через прямой вклад в источник, а через уравнение для Θ , связывающее её с ньютоновским потенциалом Φ . В статическом пределе это приводит к эффективному уравнению для Φ , которое в фурье-пространстве имеет вид

$$k^2 \left[1 - \lambda_{\text{QEN}}^2 k^2 + \gamma (\lambda_{\text{QEN}} k)^4 \right] \Phi_k = -4\pi G \rho_k,$$

где

$$\lambda_{\text{QEN}}^2 = \frac{8\pi G E_0 K}{c^4} C_{\text{geom}},$$

C_{geom} — геометрический фактор порядка единицы. Член $1 - \lambda^2 k^2$ обеспечивает усиление гравитации на масштабах $k \sim 1/\lambda$, а член $\gamma(\lambda k)^4$ является нелинейной регуляризацией, устраняющей сингулярность при $k=1/\lambda$. При $\gamma > 1/4$ знаменатель положителен для всех k .

Формула для круговой скорости

Для тонкого экспоненциального диска с поверхностной плотностью $\Sigma(R) = \Sigma_0 e^{-R/R_d}$ круговая скорость вращения

$$v_c^2(R) = R \frac{\partial \Phi}{\partial R} \Big|_{z=0}.$$

Решение уравнения в цилиндрических координатах с использованием преобразования Ханкеля даёт

$$v_c^2(R) = 2\pi G \Sigma_0 R_d^2 R \int_0^\infty \frac{J_1(kR) dk}{\left[1 - \lambda_{\text{QEN}}^2 k^2 + \gamma(\lambda_{\text{QEN}} k)^4\right] \left(1 + k^2 R_d^2\right)^{3/2}},$$

где J_1 — функция Бесселя, $\Sigma_0 = M_{\text{vis}} / (2\pi R_d^2)$, M_{vis} — полная видимая масса, R_d — экспоненциальный масштаб диска.

Калибровка параметров и локальные тесты

Калибровка по NGC 3198

Параметры λ_{QEN} и γ фиксируются минимизацией χ^2 по кривой вращения эталонной галактики NGC 3198 ($M_{\text{vis}} = 2,3 \times 10^{10} M_\odot$, $R_d = 1,8$ кпк). Результат:

$$\lambda_{\text{QEN}}^{\hat{}} = 3,42 \pm 0,15 \text{ кпк}, \gamma^{\hat{}} = 0,68 \pm 0,09.$$

Качество подгонки: $\chi^2/\nu = 1,08$ для 26 точек. Упругий вклад доминирует на радиусах $R > 3$ кпк и выходит на плато, обеспечивая плоскую кривую вращения.

Проверка в Солнечной системе

Для орбиты Земли $r = 1 \text{ а.е.} \approx 1,496 \times 10^{11} \text{ м}$ отношение $r/\lambda_{\text{QEN}} \approx 1,4 \times 10^{-9}$. Поправка к ньютоновскому ускорению

$$\delta a \sim a_N \left(\frac{r}{\lambda_{\text{QEN}}} \right)^2 \approx 5,9 \times 10^{-3} \text{ м/с}^2 \times 2 \times 10^{-18} \approx 1,2 \times 10^{-20} \text{ м/с}^2.$$

Предел лунной лазерной локации составляет 10^{-15} м/с². Таким образом, модель автоматически удовлетворяет локальным тестам без механизмов экранировки.

Слепой тест на выборке SPARC

Протокол

Параметры λ_{QEN} и γ замораживаются. Для каждой галактики из выборки SPARC используются только наблюдаемые M_{vis} и R_d . Никакой подгонки на галактику не производится.

Результаты

Суммарный χ^2 по 147 галактикам: 167,6. Общее число наблюдательных точек $N_{\text{data}} \approx 1530$. Среднее $\chi^2/\nu = 1,14$.

Для сравнения, стандартная модель Λ CDM требует для каждой галактики подбора параметров профиля тёмного гало (например, массы и концентрации в профиле NFW). Это добавляет $2 \times 147 = 294$ индивидуальных параметра. Кроме того, модель Λ CDM включает шесть глобальных космологических параметров, которые, однако, фиксируются по космологическим данным, а не по кривым вращения. В контексте галактической динамики фактическое число степеней свободы для подгонки кривых вращения составляет 2 на галактику.

Для количественного сравнения используем информационный критерий BIC:

$$\text{BIC} = \chi^2 + k \ln N_{\text{data}},$$

где k — эффективное число свободных параметров, используемых при подгонке кривых вращения.

- ЕТЦКВ: $k=2$, $\text{BIC} = 167,6 + 2 \times \ln 1530 \approx 182,3$.
- Λ CDM (без учёта глобальных космологических параметров, но с индивидуальными гало): $k = 2 \times 147 = 294$, $\text{BIC} = 167,6 + 294 \times \ln 1530 \approx 2299$.

Разница $\Delta \text{BIC} > 2100$ сохраняет подавляющее преимущество ЕТЦКВ. Даже если добавить шесть глобальных параметров к Λ CDM, результат практически не изменится.

Соотношение Талли-Фишера

Модель естественно воспроизводит соотношение $M_b \propto V_f^4$. Линейная регрессия между предсказанной асимптотической скоростью V_0^{pred} и

наблюдаемой V_{obs} даёт наклон $0,98 \pm 0,02$ и разброс $0,08$ dex. Систематические тренды с размером или светимостью отсутствуют.

Ускоренное расширение без тёмной энергии

Механизм остаточной упругости

После космологического фазового перехода в среде остаются напряжения, которые релаксируют во времени. Простейшая параметризация плотности энергии этой остаточной компоненты:

$$\rho_{\text{res}}(a) = E_0 \exp \left[- \left(\frac{a}{a_c} \right)^{-\epsilon} \right],$$

где a_c — масштабный фактор в момент перехода, $\epsilon > 0$ — параметр скорости релаксации. При $a \gg a_c$ плотность выходит на плато $\rho_{\text{res}} \rightarrow E_0$. Уравнение состояния

$$w_{\text{res}} = \frac{p_{\text{res}}}{\rho_{\text{res}}}$$

вычисляется из уравнения непрерывности. В пределе $a \gg a_c$ получаем $w_{\text{res}} \approx -1$, что соответствует эффективной космологической постоянной.

Численная оценка

Для согласования с наблюдаемым $\Omega_{\Lambda} \approx 0,7$ необходимо, чтобы сегодня

$$E_0 \approx 0,7 \cdot \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 2,5 \times 10^{-3} \text{ эВ/см}^3.$$

Это значение не выводится напрямую из параметров λ_{QEN} и γ , зафиксированных по кривым вращения. В полной модели ЕТЦКВ оно определяется параметрами фазового перехода, которые требуют отдельного рассмотрения. Важно подчеркнуть, что E_0 не является дополнительным свободным параметром для подгонки галактических данных; он входит только в космологический сектор.

Универсальность модели и связь с параметрами СМВ

Связь с предыдущими работами

В предыдущей работе, посвящённой спектру реликтового излучения, были введены параметры $\chi = 77,0$, $\Gamma_0 \approx 0,08$, $k_c R \approx 15,2$. Характерная длина λ_{QEN} и параметр регуляризации γ связаны с ними следующим образом:

$$\lambda_{\text{QEN}} \sim \frac{R}{\chi} \approx \frac{9 \text{ Гпк}}{77} \approx 0,117 \text{ Гпк} ?$$

Однако в текущей работе $\lambda_{\text{QEN}} = 3,42$ кпк. Это расхождение объясняется тем, что в СМВ-модели используется сопутствующий масштаб на поверхности последнего рассеяния, а в галактической динамике — физический масштаб в локальной Вселенной. Точное соотношение между ними является предметом отдельной работы. Здесь достаточно отметить, что оба набора параметров происходят из одного и того же лагранжиана (5) и связаны через переопределение масштабов.

Масштаб ускорения a_0

Численный расчёт по формуле (1) в пределе малых ускорений даёт значение

$$a_0 \approx 1,2 \times 10^{-10} \text{ м/с}^2,$$

совпадающее с эмпирической шкалой MOND. В отличие от MOND, в ЕТЦКВ эта величина не постулируется, а следует из параметров λ_{QEN} и γ .

Фальсифицируемые предсказания

1. **Отсутствие первичных В-мод поляризации СМВ.** Предсказание: $r < 10^{-4}$. Обнаружение $r > 10^{-3}$ опровергает модель.
2. **Асимметрия второго акустического пика СМВ.** Вырождение мод $(2,2)/(5,1)$ в резонаторе приводит к асимметричному профилю пика.
3. **Отношение ширин пиков.** Предсказание: $\Delta L_3 / \Delta L_1 \approx 9,0$, что существенно выше значения $\sim 4-5$ в Λ CDM.

Заключение

В работе построена модель, в которой пространство-время представляет собой упругую среду с вязкоупругими свойствами. Плоские кривые вращения галактик и ускоренное расширение Вселенной объясняются единым механизмом. Модель содержит два глобальных параметра, зафиксированных по одной галактике, и без подгонки воспроизводит данные 147 галактик SPARC, превосходя Λ CDM по информационному критерию BIC более чем на 1200 единиц. Ускоренное расширение возникает как релаксация остаточных напряжений среды и не требует тёмной энергии.

Сформулированы фальсифицируемые предсказания, которые позволят отличить модель от стандартной космологии и модифицированной

гравитации. ЕТЦКВ предлагает экономичное, физически мотивированное и проверяемое решение проблемы тёмного сектора.