

Гипотеза Фермионной Вселенной: эмерджентные гравитация и тёмные компоненты из одного фермионного поля

Аннотация

В работе формулируется Гипотеза Фермионной Вселенной (FUH), в рамках которой фундаментальное многокомпонентное фермионное поле ψ рассматривается как источник как минимум части наблюдаемых частиц и взаимодействий. Калибровочные поля и гравитация трактуются не как независимые фундаментальные объекты, а как коллективные возбуждения и эмерджентные эффекты фермионного конденсата ψ . Модель задаётся через фундаментальный лагранжиан с четырёхфермионными взаимодействиями и соответствующий эффективный лагранжиан низких энергий и приводит к ряду фальсифицируемых космологических и астрофизических предсказаний.

Введение

Современная физика стремится к объединению электрослабых и сильных взаимодействий со стабильной теорией гравитации на квантовом уровне. Стандартная модель успешно описывает калибровочные взаимодействия на базе группы $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, а Общая теория относительности — классическую гравитацию, однако их полная унификация остаётся открытой задачей. В Гипотезе Фермионной Вселенной постулируется одно фундаментальное поле ψ , для которого задаётся микроскопический лагранжиан; за счёт внутренних симметрий, их спонтанного нарушения и четырёхфермионных взаимодействий из ψ возникают эффективные калибровочные поля и эмерджентная метрика, так что тёмная материя, тёмная энергия и гравитация описываются как различные режимы фермионного конденсата.

Основные идеи

- В модели FUH фундаментальным является одно фермионное поле ψ с внутренними степенями свободы, для которого задаётся микроскопический лагранжиан с кинетическим членом и четырёхфермионными взаимодействиями; через преобразование Хаббарда–Стратоновича эти взаимодействия можно переписать в виде эффективных калибровочных полей A_μ , трактуемых как композитные возбуждения ψ .
- Спонтанная конденсация ψ ($\langle\psi\bar{\psi}\rangle \neq 0$) порождает фермионный конденсат и задаёт эффективные массы для фермионов и композитных бозонных мод без введения отдельного фундаментального хиггсовского поля, а макроскопическая гравитация описывается как индуцированное искривление пространства-времени, возникшее из тензора энергии-импульса $T_{\mu\nu}[\psi]$.

Наблюдательные следствия

- На космологических масштабах конденсат ψ ведёт себя как холодная тёмная материя на ранних стадиях ($w_\psi \approx 0$) и как динамическая тёмная энергия на поздних ($w_\psi < -1$), задавая $\rho_\psi(a)$ и историю расширения $H(z)$; это позволяет тестировать модель с помощью данных СМВ, ВАО, сверхновых Ia и линзирования, в том числе в контексте напряжения Хаббла.
- В режиме сильного поля фермионные конденсаты ψ могут описывать компактные объекты, в том числе чёрные дыры без центральной сингулярности; сравнение масс, теней и спектров таких конфигураций с наблюдениями ЕНТ и гравитационно-волновыми событиями (LIGO/Virgo) даёт дополнительный класс тестов FUH.

Полный лагранжиан и уравнения движения

В модели FUH фундаментальным является одно фермионное поле ψ . На микроуровне вся динамика задаётся лагранжианом

$$L_{\text{fund}} = \bar{\psi} (i \gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi - \lambda (\bar{\psi} \psi)^2 - \kappa (\bar{\psi} \gamma^\mu \psi) (\bar{\psi} \gamma_\mu \psi) + \eta (\bar{\psi} \psi - v)^2.$$

Первый член описывает свободный фермион массы m . Второй и третий члены задают короткодействующие четырёх-фермионные взаимодействия, за счёт которых поле ψ конденсируется и порождает коллективные (эмержентные) моды, играющие роль калибровочных и гравитационных степеней свободы в духе индуцированной гравитации и сценариев emergent gauge fields. Член $\eta (\bar{\psi} \psi - v)^2$ фиксирует ненулевое вакуумное среднее v и описывает фазовый переход в фермионный конденсат, по смыслу аналогичный хиггсовскому механизму.

В низкоэнергетическом пределе вводятся составные, то есть определённые через ψ , эффективные поля

$$A_\mu(x) = \beta \langle \bar{\psi} \gamma_\mu \psi \rangle — \text{эмержентный калибровочный потенциал},$$

$$g_{\mu\nu}(x) = \eta_{\mu\nu} + \alpha \langle \bar{\psi} \gamma_\mu (\mu i \partial_\nu) \psi \rangle — \text{эмержентная метрика}.$$

После интегрирования по высокочастотным модам ψ в эффективном действии возникают члены вида $R / (16 \pi G_{\text{ind}})$ и $-(1/4) F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$ с индуцированными константами G_{ind} , g_{ind} и эффективной космологической постоянной Λ_{eff} .

Таким образом, гравитация и калибровочное поле описываются стандартными терминами Эйнштейна–Гильberta и Максвелла, но трактуются как коллективные возбуждения фермионного конденсата, а не как независимые фундаментальные поля.

Эффективный лагранжиан низких энергий имеет вид

$$L_{\text{eff}} = \bar{\psi} (i \gamma^\mu \nabla_\mu - m_{\text{eff}}) \psi - \Lambda_{\text{eff}} - (1/4) F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + R / (16 \pi G_{\text{ind}}) + a_1 R^2 + a_2 R_{\mu\nu} R^{\mu\nu} + b_1 (\bar{\psi} \psi)^3 + b_2 (\bar{\psi} \gamma^\mu \psi)(\bar{\psi} \gamma_\mu \psi)(\bar{\psi} \psi) + c_1 R \bar{\psi} \psi + c_2 R_{\mu\nu} \bar{\psi} \gamma^\mu \nabla^\nu \psi + d_1 (\nabla_\alpha F_{\mu\nu})(\nabla^\alpha F^{\mu\nu}).$$

В рамках усечённого эффективного описания (с операторами не выше четвёртого порядка по полям и вторым производным) коэффициенты a_i , b_i , c_i и d_1 считаются безразмерными параметрами, зависящими от фундаментального фермионного сектора и ультрафиолетового среза; соответствующие члены интерпретируются как высшие по размерности операторы, существенные лишь при обсуждении пределов применимости модели, тогда как в феноменологическом анализе космологии и компактных объектов используются в первую очередь первые четыре слагаемых. Здесь $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$, а индуцированные константы m_{eff} , G_{ind} , Λ_{eff} и эффективный заряд g_{ind} также выражаются через параметры фермионного сектора.

Вариация по $\bar{\psi}$ даёт обобщённое уравнение Дирака на фоне эмерджентных полей

$$i \gamma^\mu \nabla_\mu \psi - m_{\text{eff}} \psi = [2 \lambda (\bar{\psi} \psi) + 2 \eta (\bar{\psi} \psi - v)] \psi + g_{\text{ind}} \gamma^\mu A_\mu \psi.$$

Левая часть описывает распространение фермиона спина 1/2 в метрике $g_{\mu\nu}[\psi]$, правая задаёт эффективную массу за счёт конденсата и индуцированное калибровочное взаимодействие с зарядом g_{ind} . Вариация по составному полю A_μ приводит к уравнению типа Максвелла

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = g_{\text{ind}} \bar{\psi} \gamma^\nu \psi,$$

Которое интерпретируется как динамика эмерджентного гейдж-поля, полностью порождённого токами ψ . Гравитационный сектор описывается уравнениями Эйнштейна с индуцированной гравитационной постоянной

$$R_{\mu\nu} - (1/2) g_{\mu\nu} R = 8 \pi G_{\text{ind}} T_{\mu\nu}[\psi],$$

Где тензор энергии-импульса $T_{\mu\nu}$ целиком построен из фермионного поля и его конденсата; плотность энергии ρ_ψ и давление p_ψ следуют из исходного лагранжиана L_{fund} стандартным образом.

Вся последующая космология (однородный конденсат $\psi(a)$, плотность $\rho_\psi(a)$, параметр уравнения состояния $w_\psi(a)$, уравнение Фридмана с $\rho_{\text{total}} = \rho_m a^{-3} + \rho_\psi(a)$) и астрофизика компактных объектов (фермионные «чёрные дыры» с профилем $\psi(r)$ и тенью, согласующейся с данными ЕНТ) рассматриваются как макроскопические решения этих уравнений. В этом смысле и геометрия, и эффективные поля оказываются различными фазами и режимами одного и того же фундаментального фермионного поля ψ .

Сравнение с альтернативными подходами

- Теория струн: рассматривает одномерные фундаментальные объекты (струны), живущие в пространстве с дополнительными измерениями; калибровочные поля и гравитация встроены в единую струнную динамику, но фермионное поле не играет выделенной роли как универсальный строительный блок, в отличие от FUH.
- Петлевая квантовая гравитация: квантует саму геометрию пространства-времени и выводит дискретный спектр геометрических величин, не вводя нового фундаментального матерного поля; в FUH, напротив, геометрия трактуется как эмерджентная, порождённая конденсатом ψ .
- Модели с дополнительными измерениями: объясняют иерархии и структуру взаимодействий через геометрию extra dimensions и, как правило, предсказывают новые бозоны и возбуждения Калуцы–Клейна; в FUH ставка делается на одно фермионное поле и его конденсацию без ввода дополнительных измерений и элементарных бозонных степеней свободы. Обновлённая доработка FUH: Конкретное предсказание, математический вывод и прозрачность параметров.

Ограничения и объём текущей версии FUH

В настоящей работе рассматривается минимальная версия Гипотезы Фермионной Вселенной, основанная на фундаментальном лагранжиане L_{fund} для одного фермионного поля ψ и его эмерджентных гравитационных и калибровочных степеней свободы, описываемых эффективным лагранжианом L_{eff} . Дополнительные спекулятивные элементы, такие как конкретные резонансы на уровне $\approx \text{TeV}$, детальные предсказания для отношения m_p/m_e , модификации G_{eff} , зависящие от локальной плотности, и специфические сценарии для тёмной материи и тёмной энергии на основе FCP, в данной версии модели не используются и оставляются за рамками анализа.

Основное внимание уделяется формулировке фермионной эффективной теории поля с высшими операторами, обсуждению её согласованности как эффективной теории (с конечным ультрафиолетовым срезом) и программе наблюдательных тестов в космологии и астрофизике компактных объектов.

Черные дыры в Гипотезе Фермионной Вселенной

В FUH черные дыры трактуются как высококонцентрированные конденсаты фермионного поля ψ , где локальная плотность энергии ρ_ψ становится очень большой и вызывает сильное искривление пространства-времени; плотное состояние задаётся четырёх-фермионными взаимодействиями, а макроскопические свойства описываются эмерджентной метрикой $g_{\mu\nu}[\psi]$. В таком описании конденсат ψ усиливает эффективное притяжение и формирует область с радиусом порядка $r_s \approx 2GM/c^2$, внутренняя структура которой — стабильный «фермионный клубок» конечной плотности, а энтропия естественно выражается как $S \approx A/4$ за счёт квантовых степеней свободы ψ на горизонте.

Этот подход нацелен на то, чтобы связать избегание сингулярности и информационного парадокса с квантовым состоянием конденсата вместо

классической точки, а также получить проверяемые эффекты: небольшие отклонения в структуре аккреционных дисков, спектрах излучения и кольцевых изображениях/тенях черных дыр (EHT, LIGO/Virgo) по сравнению со стандартными решениями Керра в ОТО.

Связь с напряжением Хаббла и данными ACT DR6

В Гипотезе Фермионной Вселенной (FUH) крупномасштабная динамика задаётся одним фермионным полем ψ : тёмная материя и тёмная энергия — разные фазы его конденсата с уравнением состояния $w\psi(a) = p\psi / \rho\psi$. На ранних этапах конденсат ведёт себя как холодная тёмная материя ($w\psi \approx 0$), а на поздних приобретает отрицательное давление ($w\psi < -1$) и ускоряет расширение.

Такой подход предлагается как альтернатива расширенным моделям Λ CDM, где добавляют отдельные компоненты или модифицируют гравитацию феноменологически. Недавний анализ финального набора данных DR6 Atacama Cosmology Telescope показал, что многие из этих расширений плохо согласуются с высокоточным спектром температуры и поляризации СМВ, но при этом усилил реальность напряжения Хаббла: оценки H_0 из ранней Вселенной и локальных наблюдений остаются несовместимыми, и простыми поправками к Λ CDM это не устраняется.

В FUH не вводится отдельный эпизод ранней тёмной энергии и не добавляются новые поля поверх стандартной картины: тот же конденсат ψ , что формирует структуру, задаёт и поздневременную вакуумоподобную компоненту. Давление $p\psi$ и плотность $\rho\psi$ определяются микроскопическим самодействием, так что история расширения $H(z)$ становится эмерджентным свойством фермионной жидкости. Модель по построению может имитировать Λ CDM на высоких красных смещениях (совместимость с ACT, Planck, SPT), но допускать контролируемые отклонения на малых z — именно там, где возникает напряжение Хаббла.

Это задаёт конкретную программу проверок. Задав явный вид $w\psi(a)$, выведенный из микрофизики, модель реализуют в стандартизованных кодах CAMB или CLASS и вычисляют спектры СМВ, барионные акустические осцилляции, диаграмму расстояний по сверхновым и рост структуры. Критерии: сохранение согласия с ограничениями ACT DR6 на спектры и линзирование СМВ и одновременное получение несколько большего позднего значения H_0 по сравнению с Λ CDM-оценкой из СМВ без конфликта с ВАО и SNe Ia.

Таким образом, новые результаты ACT не опровергают FUH, а сужают класс допустимых расширений и подталкивают к моделям, где ускорение и тёмная материя возникают из одного микроскопического фермионного поля ψ .

Наблюдательная проверка Гипотезы Фермионной Вселенной

В FUH одно фермионное поле ψ играет роль и тёмной материи, и тёмной энергии: на ранних стадиях Вселенной оно ведёт себя как почти холодная материя ($w\psi \approx 0$), а на поздних — как тёмная энергия с $w\psi < -1$, задавая $\rho\psi(a)$ и $H(z)$.

План проверки

- Ввести параметризацию $w\psi(a)$ и несколько параметров поля (масса, самодействие).
- Заменить « Λ CDM + Λ » на ψ в кодах CAMB или CLASS и получить спектр СМВ, $H(z)$ и рост структур.
- Сравнить с данными Planck, ACT DR6, BAO, SNe Ia и линзирования и проверить, может ли ψ -космология сохранить точное согласие с СМВ и одновременно естественно повысить локальное H_0 , смягчив напряжение Хаббла.

Дополнительно можно моделировать аккрецию и тени ψ -ядер и сопоставлять их с наблюдениями ЕНТ и сигналами LIGO/Virgo; успешное воспроизведение масс, теней и спектров на уровне классических чёрных дыр будет сильным аргументом в пользу фермионной картины.

Заключение

Гипотеза Фермионной Вселенной описывает тёмную материю, тёмную энергию и гравитацию как эмерджентные проявления единого фермионного поля ψ и его конденсата, в котором калибровочные поля и метрика возникают как коллективные низкоэнергетические возбуждения. В отличие от феноменологических расширений Λ CDM и модифицированной гравитации, здесь задаётся конкретный микроскопический лагранжиан с четырёхфермионными взаимодействиями и соответствующий эффективный лагранжиан низких энергий с индуцированными терминами Эйнштейна–Гильберта и Максвелла.

На космологических масштабах конденсат ψ ведёт себя как холодная тёмная материя на ранних стадиях и как динамическая тёмная энергия на поздних, задавая эффективное уравнение состояния $w_{\psi}(a)$, плотность $\rho_{\psi}(a)$ и историю расширения $H(z)$, что позволяет напрямую тестировать модель на данных СМВ, ВАО, сверхновых Ia и гравитационного линзирования, включая напряжение Хаббла. В режиме сильного поля та же теория описывает компактные объекты, близкие к чёрным дырам без сингулярности, для которых массы, тени и характеристики акреции можно сопоставлять с наблюдениями ЕНТ и событиями LIGO/Virgo. В совокупности это делает FUH не только концептуальным предложением об «одном поле», но и эффективной теорией с чёткой программой количественных проверок на астрофизических и космологических данных.

Источники

1. Четырёхфермионные взаимодействия и конденсация

- Y. Nambu, G. Jona-Lasinio, Phys. Rev. 122, 345 (1961) — модель с лагранжианом $\bar{\psi}(i\partial - m)\psi - \lambda(\bar{\psi}\psi)^2$ и фермионным конденсатом.

- M.E. Peskin, D.V. Schroeder, An Introduction to Quantum Field Theory — дираковский лагранжиан и примеры самовзаимодействий.

2. Вспомогательные поля и эффективные бозоны

- J. Zinn-Justin, Quantum Field Theory and Critical Phenomena — Hubbard–Stratonovich-преобразование для $(\bar{\psi}\psi)^2$.

- S. Coleman, Aspects of Symmetry — функциональные интегралы и композитные поля.

3. Эффективные теории и композитные калибровочные поля

- S. Weinberg, The Quantum Theory of Fields, Vol. 2 — интегрирование по фермионам и появление композитных бозонных мод.

- H. Georgi, Effective Field Theory, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 43, 209 (1993).

4. Индуцированная и эмерджентная гравитация

- A.D. Sakharov, Dokl. Akad. Nauk SSSR 177, 70 (1967) — идея индуцированной гравитации от квантовых флуктуаций материи.

- T. Jacobson, Phys. Rev. Lett. 75, 1260 (1995) — вывод уравнений Эйнштейна из термодинамики горизонтов.