

Стандартная модель: Техническое введение в наше текущее понимание Вселенной

На самом высоком уровне абстракции наши знания о физической Вселенной можно сжать в одно символическое выражение. Записанное на языке интегралов по траекториям, оно выглядит следующим образом:

$$W = \int_{k < \Lambda} [Dg][DA][D\psi][D\Phi] \exp \left\{ i \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{m_p^2}{2} R - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + i \bar{\psi}^i \gamma^\mu D_\mu \psi^i + (\bar{\psi}_L^i V_{ij} \Phi \psi_R^j + h.c.) - |D_\mu \Phi|^2 - V(\Phi) \right] \right\}.$$

Это выражение, плотное и компактное, представляет собой *форму интеграла по траекториям Стандартной модели плюс гравитация*. Оно объединяет квантовую механику, пространство-время, материю, силы и генерацию массы в единую структуру. Разберем его по частям.

1. Квантовая механика: Интеграл по траекториям

Предварительный множитель

$$W = \int [Dg][DA][D\psi][D\Phi] e^{iS}$$

является **генерирующим функционалом** квантовой теории поля.

Он утверждает, что для вычисления любого процесса необходимо суммировать *все возможные конфигурации полей*: геометрии g , калибровочные поля A , фермионные поля ψ и поле Хиггса Φ . Каждая конфигурация вносит вклад с весом e^{iS} , где S — действие.

Это суть **квантовой механики, расширенной на поля**: реальность — это интерференционный узор всех возможных историй.

2. Пространство-время и гравитация

Член

$$\frac{m_p^2}{2} R$$

представляет **действие Эйнштейна-Гильберта**, где R — скалярная кривизна Риччи, а m_p — приведенная масса Планка.

Он кодирует **общую теорию относительности**: пространство-время динамично и искривляется под воздействием энергии и импульса.

Хотя квантовая консистентность гравитации остается нерешенной, включение этого члена выражает нашу лучшую эффективную теорию пространства-времени.

3. Калибровочные поля: Другие силы

$$-\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu}$$

Этот компактный член кодирует динамику калибровочных полей: глюонов (сильное взаимодействие), W- и Z-бозонов (слабое взаимодействие) и фотона (электромагнетизм). Символ $F_{\mu\nu}^a$ обобщает тензор электромагнитного поля на неабелевы поля Янга-Миллса.

Из этой единственной структуры можно вывести **уравнения Максвелла** в абелевом пределе, а также весь аппарат квантовой хромодинамики (QCD) и электрослабой теории.

4. Поля материи

$$i\bar{\psi}^i \gamma^\mu D_\mu \psi^i$$

Это **действие Дирака** для фермионов: кварков и лептонов. Индекс i охватывает три поколения.

Ковариантная производная D_μ связывает поля материи с калибровочными полями, обеспечивая согласованность с симметриями Стандартной модели.

Это математическое утверждение о том, как частицы материи распространяются и взаимодействуют с силами.

5. Юкавовские взаимодействия

$$\bar{\psi}_L^i V_{ij} \Phi \psi_R^j + \text{h.c.}$$

Эти члены описывают **юкавовские взаимодействия**: связи фермионов с полем Хиггса Φ .

Как только поле Хиггса приобретает вакуумное ожидаемое значение, эти взаимодействия преобразуются в **массы фермионов**.

Коэффициенты V_{ij} кодируют структуру смешивания ароматов (например, матрицу CKM для кварков).

6. Сектор Хиггса

$$-|D_\mu \Phi|^2 - V(\Phi)$$

Здесь находится само поле Хиггса.

Кинетический член $|D_\mu \Phi|^2$ связывает его с калибровочными бозонами, в то время как потенциал

$$V(\Phi) = \mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2$$

приводит к **спонтанному нарушению симметрии**.

Это нарушает $SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em}$, придавая массу бозонам W и Z, оставляя фотон безмассовым.

Открытие бозона Хиггса в CERN в 2012 году подтвердило эту структуру.

7. Единое утверждение

В совокупности это действие выражает:

- **Квантовую механику** через интеграл по траекториям.
- **Пространство-время и гравитацию** через член Эйнштейна-Гильберта.
- **Калибровочные взаимодействия** (сильное, слабое, электромагнитное).
- **Поля материи** (кварки и лептоны).
- **Генерацию массы** через механизм Хиггса и юкавовские взаимодействия.

Это не окончательная «теория всего» — она опускает темную материю, темную энергию и полную квантовую теорию гравитации — но это **наиболее полное описание реальности, достигнутое человечеством на данный момент**.

Заключение

Если другая разумная форма жизни попросила бы нас изложить законы природы, мы бы представили это уравнение.

Это не поэзия, но оно несет глубокую красоту: одно выражение, кодирующее динамику пространства, времени, материи и взаимодействий.

Это наше **текущее понимание Вселенной**, сжатое в математику.