

О современной физической теории фундаментальных взаимодействий с точки зрения концепций античной философии

Ю.М.Письмак

Кафедра физики высоких энергий и элементарных частиц,
физический факультет СПбГУ

Семинар "Актуальные проблемы философии науки" ,
24 октября 2015 г.

Излагаются основные положения современной квантовополевой теории взаимодействия элементарных частиц. Лежащие в ее основе физические принципы сопоставляются с представлениями о мироустройстве Пифагора, Демокрита, Гераклита и Платона.

Я,
существовать,
сознание,
воспринимать,
мыслить,
сходство, различие,
не Я, оно, они, мы,
реальность,
объект,
явление, процесс,
пространство, время,
система, элемент, состояние
свобода, взаимодействие, целостность

Материальная точка в классической механике

Модель трехмерного пространства: множество точек, каждая из которых определяется набором трех чисел $(x_1, x_2, x_3) = \vec{x}$. Модель времени - параметр t . Движение материальной точки описывается функцией $\vec{x}(t)$.

Принцип Гамильтона. Модель физической системы определяется функционалом действия

$$S(\vec{x}) = \int_{t_1}^{t_2} \left(m \frac{\vec{v}^2(t)}{2} - U(\vec{x}(t)) \right) dt.$$

Здесь $\vec{v}(t)$ скорость в момент времени t движущейся по (виртуальной) траектории $\vec{x}(t)$ материальной точки, m , $U(\vec{x}(t))$ - ее масса и потенциальная энергия,

$$\vec{v}(t) = \frac{d\vec{x}(t)}{dt}.$$

Материальная точка в классической механике

Для реальной (экспериментально наблюдаемой) траектории $\vec{x}_r(t)$ движения частицы действие экстремально:

$$\delta S(\vec{x})|_{\vec{x}(t)=\vec{x}_r(t)} = 0.$$

Отсюда следует, что $\vec{x}_r(t)$ является решением уравнения Эйлера-Лагранжа:

$$m\vec{a}(t) = \vec{F}(t),$$
$$\vec{a}(t) = \left. \frac{d\vec{x}}{dt} \right|_{\vec{x}(t)=\vec{x}_r(t)}, \quad F_i(t) = - \left. \frac{\partial U(\mathbf{x})}{\partial x_i} \right|_{\vec{x}(t)=\vec{x}_r(t)}.$$

Уравнение Эйлера-Лагранжа представляет собой формальную запись второго закона Ньютона ($\vec{a}(t)$ -ускорение частицы, $\vec{F}(t)$ - действующая на нее сила).

Виртуальной траектории $\vec{x}(t)$ сопоставляется амплитуда вероятности перехода по ней частицы:

$$M(\vec{x}) = e^{\frac{i}{\hbar}S(\vec{x})}.$$

Реальная, полная амплитуда вероятности перехода M_r получается суммированием всех виртуальных:

$$M_r = \int e^{\frac{i}{\hbar}S(\vec{x})} D\vec{x}.$$

Вероятность перехода P_r определяется амплитудой M_r

$$P_r = |M_r|^2.$$

Поле - это среда, заполняющая некоторую область пространства. В каждой точке пространства $\vec{x}$ она характеризуется некоторой зависящей от времени t функцией (вообще говоря, набором функций) $\varphi(t, \vec{x})$. Функция $\varphi(t, \vec{x})$ описывает состояние (конфигурацию) поля. В рамках гамильтонова подхода модель поведения среды определяется функционалом действия $S(\varphi)$. Для реального состояния поля $\varphi_r(t, \vec{x})$ действие $S(\varphi)$ имеет экстремальное значение:

$$\delta S(\varphi)|_{\varphi(t, \vec{x})=\varphi_r(t, \vec{x})} = 0,$$

и $\varphi_r(t, \vec{x})$ удовлетворяет дифференциальным уравнениям Эйлера-Лагранжа.

Каждой конфигурации поля $\varphi(t, \vec{x})$ сопоставляется амплитуда вероятности

$$e^{\frac{i}{\hbar}S(\varphi)},$$

а наблюдаемой величине F функционал $F(\varphi)$.

Соответствующая F амплитуда вероятности получается в результате усреднения

$$M_F = \int e^{\frac{i}{\hbar}S(\varphi)} F(\varphi) D\varphi.$$

Если в качестве $F(\varphi)$ выбирается произведение полей $\varphi(t_1, \vec{x}_1) \cdots \varphi(t_n, \vec{x}_n)$, то M_F называется функцией Грина. Эти функции описывают характеристики взаимодействия простейших возбуждений среды (квантового вакуума), элементарных частиц и происходящие с ними процессы.

Точке пространства-времени соответствует 4-вектор $x = (x_0, x_1, x_2, x_3)$. Преобразования Лоренца не меняют скалярное произведение $x^2 = x_0^2 - x_1^2 - x_2^2 - x_3^2 = x_\mu x^\mu$. Наблюдаемое электромагнитное поле - характеризуется напряженностями электрического поля $\vec{E}(x)$, и магнитного поля $\vec{H}(x)$. Для построения Лоренц-инвариантного действия вводится вектор-потенциал $A_\mu(x)$, $\mu = 0, 1, 2, 3$. Действие записывается в виде

$$S(A) = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}, \quad F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu.$$

Уравнения Эйлера-Лагранжа

$$\partial^\mu F_{\mu\nu} = 0$$

представляют собой обычные уравнения Максвелла для $\vec{E}(x)$, и $\vec{H}(x)$, если подставить в них $F_{0i} = -F_{i0} = E_i$, $i = 1, 2, 3$, $F_{23} = -F_{32} = H_1$, $F_{13} = -F_{31} = H_3$, $F_{12} = -F_{21} = H_2$. Действие, уравнения Эйлера-Лагранжа, напряженности электрического и магнитного полей инвариантны относительно калибровочного преобразования

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial_\mu \varphi.$$

Поле Дирака описывает электроны и позитроны. Это четырехкомпонентное комплексное спинорное поле $\psi(x)$. Лоренцинвариантное действие поля Дирака имеет вид

$$S(\bar{\psi}, \psi) = \bar{\psi}(i\hat{\partial} - m)\psi.$$

Здесь использованы обозначения

$$\hat{\partial} = \gamma^\mu \partial_\mu, \quad \bar{\psi} = \psi^* \gamma^0,$$

и γ^μ - 4×4 матрицы, для которых

$$\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = \gamma^\mu \gamma^\nu + \gamma^\nu \gamma^\mu = g^{\mu\nu}, \quad g^{\mu\nu} = \text{diag}(1, -1, -1, -1).$$

Калибровочная инвариантность и квантовая электродинамика

Уравнения Эйлера-Лагранжа являются уравнениями Дирака

$$(i\hat{\partial} - m)\psi = 0, \quad \bar{\psi}(i\hat{\partial} - m) = 0.$$

Действие инвариантно относительно глобальных калибровочных преобразований:

$$\psi \rightarrow e^{i\varphi}\psi, \quad \bar{\psi} \rightarrow e^{-i\varphi}\bar{\psi},$$

где φ - константа. Чтобы оно было инвариантно относительно локальных калибровочных преобразований с функцией $\varphi(x)$, к нему нужно добавить вклад взаимодействия дираковского поля с "компенсирующим" векторным, в качестве которого естественно использовать электромагнитное. Так получается действие квантовой электродинамики

$$S(\bar{\psi}, \psi, A) = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{\psi}(i\hat{\partial} - m + ie\hat{A})\psi.$$

В Стандартной модели объединяются сильные слабые и электромагнитные взаимодействия. Сильным и слабым взаимодействиям соответствуют дополнительные индексы у спинорных полей Дирака: "цвета" и "ароматы". У лептонов (слабое взаимодействие) есть 6 "ароматов", у кварков (сильное и слабое взаимодействие) есть 3 "цвета" и 6 "ароматов". Соответствующие векторные компенсирующие поля (поле глюонов и промежуточных векторных бозонов) являются матрицами. Такие калибровочные поля называются полями Янга-Миллса.

Калибровочные преобразования для полей Янга-Миллса не коммутируют, из-за чего функционалы действия для них оказываются неквадратичными по полям:

$$S(A) = -\frac{1}{4g} \text{Tr} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}, \quad F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu + [A_\mu, A_\nu].$$

Гравитация как "компенсирующее" поле возникает, если потребовать инвариантности функционала действия относительно произвольных локальных преобразований координат пространства-времени.

О философии Пифагора и пифагорейцев в статье С.Трубецкого в Энциклопедии Брокгауза и Евфрона:
"Мировая гармония, в которой заключается закон мироздания, есть единство во множестве и множество в единстве. Как мыслить эту истину? Непосредственным ответом на это является число: в нем объединяется множество, оно есть начало всякой меры".

Демокрит, признавая явления, т. е. множественность и движение, должен был признать реальность и небытия, т. е. пустоты. Бытие не едино, а состоит из бесчисленного множества неделимых и незримых тел, атомов, движущихся в пространстве. Возникновение и уничтожение есть не что иное, как соединение и разъединение атомов; следовательно, строго говоря, нет ни возникновения, ни уничтожения; бытие вечно, а множественность его происходит от того, что пустота разделяет бытие на незримые частички. Атомы определяются Демокритом всеми атрибутами, которые элеаты приписывали бытию: они вечны, т. е. не возникли и не уничтожатся; они вполне заполняют собой пространство, т. е. в самом атоме нет уже пустоты; они неделимы, а потому и неизменяемы; они просты и однородны по составу - следовательно, все их различие сводится к количественным моментам, а качественных различий нет. (Из статьи Э.Радлова в Энциклопедии Брокгауза и Евфрона)

О философии Гераклита в статье С.Трубецкого в Энциклопедии Брокгауза и Евфрона. "Философия есть размышление о великих загадках жизни, о противоречиях, на которые всюду наталкивается пробудившийся ум в познаваемой им действительности. Противоположные начала единства и множества, конечного и бесконечного, покоя и движения, света и тьмы, добра и зла, активного и пассивного исключают друг друга, и в то же время весь строй вселенной держится их гармоническим сочетанием".

В Соловьев о теории идей Платона (статья в Энциклопедии Брокгауза и Евфрона). Идея есть умообразная сущность или безусловный образ бытия, совпадающий с безусловным образом мышления. Мы находим у Платона возможность трех главных способов разумения идей. 1) Идеи суть общие родовые понятия, то, что потом в схоластике называлось *universalia*; 2) Идеи суть действительные первообразы данных в являемом мире предметов, или особые качественные реальности, отличающиеся от чувственных вещей вечностью, неизменностью и высочайшим превосходством во всех отношениях; 3) Идеи суть безусловные умопостигаемые нормы, или первоначала достойного существования, достаточные основания для определения положительной качественности всего существующего, вечные пределы всякого бытия с трех главных сторон - этической, логической и эстетической.

Спасибо за внимание!