

Лекция №7. История естествознания: Квантовая теория поля

Давыдов Виктор Николаевич
проф. каф. современного
естествознания и экологии
ИНЖЭКОН

Основная идея квантовой теории поля (вторая половина 20 в.)

Любое поле имеет дискретную структуру и ему должны соответствовать определенные частицы - кванты этого поля (Следствие из принципа квантово-волнового дуализма).

Механизм взаимодействий

Согласно квантовой теории поля все взаимодействия осуществляются благодаря обмену так называемыми виртуальными частицами.

Виртуальные (возможные) частицы рождаются и поглощаются на промежуточных этапах взаимодействия. Обнаруживаются лишь опосредовано, по некоторым их проявлениям, экспериментально их наличие в этих взаимодействиях пока не зафиксировано.

Фундаментальные взаимодействия

К этому времени науке стали известны четыре типа взаимодействий, которые получили название фундаментальных:

- 1. Гравитационное
- 2. Электромагнитное
- 3. Слабое
- 4. Сильное.

Гравитационное взаимодействие

В 17 веке начало изучаться И. Ньютоном. Закон всемирного тяготения гласит: между двумя телами существует сила притяжения, прямо пропорциональная произведению их масс и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними.

Закон всемирного тяготения

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

F – сила притяжения, Н;

G – $6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг²;

m_1 , m_2 – массы взаимодействующих материальных точек или однородных шаров, кг;

r – расстояние между материальными точками, м;

Особенности гравитационного взаимодействия

1. Мало интенсивно. Силы электрического взаимодействия между частицами в микромире примерно в 10^{39} раз больше сил гравитационного взаимодействия. Поэтому гравитация не учитывается в теориях строения вещества.
 2. Универсально. Любая материальная частица является источником гравитационного воздействия и испытывает его на себе.
 3. Дальнодействующе. Поэтому гравитационные силы играют главную роль в образовании планетных и галактических систем.
 4. Всегда реализуется как сила притяжения.
- Переносчик гравитационного взаимодействия - гипотетическая частица гравитон (масса покоя 0).**

Электромагнитное взаимодействие

Конец 18 века: закон Кулона

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon \cdot r^2}$$

F – сила притяжения между точечными зарядами, Н;

ϵ_0 – $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м (фарад на метр);

ϵ – диэлектрическая проницаемость среды;

q_1 , q_2 – величины точечных зарядов, Кл;

r – расстояние между точечными зарядами, м;

Особенности электромагнитного взаимодействия

1. Электромагнитные взаимодействия существуют только между заряженными покоящимися частицами (электрическое поле) и между движущимися заряженными частицами (магнитное поле).
2. Электромагнитные силы могут быть как силами притяжения, так и силами отталкивания.
3. Электромагнитное взаимодействие — дальнодействующее, его интенсивность обратно пропорциональна квадрату расстояния.

Особенности электромагнитного взаимодействия

4. Электромагнитное взаимодействие намного интенсивнее гравитационного. Проявляется в микро-, макро- и мегамире.
5. Переносчики этого типа взаимодействия - фотоны (частицы с массой покоя равной 0).

Слабое взаимодействие, XX в.

При наблюдении бета-распада обнаружилось, что часть энергии «исчезала».

Физик В. Паули предположил, что в процессе радиоактивного распада вещества вместе с электроном выделяется частица, которая и уносит с собой "исчезнувшую" энергию.

Обнаружить частицу мешают ее свойства: электрическая нейтральность, высокая проникающая способность.

В 1934 г. итальянский физик Энрико Ферми назвал эту частицу "нейтрино".

Слабое взаимодействие – причина распада

Согласно теории Энрико Ферми входящие в состав ядер атомов нейтроны способны под действием сил слабого взаимодействия распадаться на протон, электрон и нейтрино.

Особенности слабого взаимодействия

1. По интенсивности меньше всех других типов, кроме гравитационного.
2. Короткодействующее, радиус его действия не более 10^{-22} см. Поэтому оно может влиять только на субатомные частицы и ответственно за распад частиц.
3. Переносчиками слабого взаимодействия являются бозоны (три частицы W^+ , W^- , Z^0 - бозоны (масса покоя отличны от нуля)).

Сильное взаимодействие, XX в.

Предположение о его существовании было сделано на основе того, что какая-то сила должна удерживать в ядре атома одноименно заряженные частицы - протоны.

Впоследствии его удалось обнаружить экспериментально.

Особенности сильного взаимодействия

1. По интенсивности превышает все остальные взаимодействия.

2. Короткодействующее, проявляется в радиусе примерно 10^{-13} см. Осуществляется внутри ядер атомов между слагающими их частицами - протонами и нейтронами.

Особенности сильного взаимодействия

3. Сильного взаимодействия нет между электронами, фотонами, нейтрино.
4. Переносчики - глюоны (восемь типов частиц с массой покоя 0).

Объединенная теория взаимодействий

1. Еще А. Эйнштейн предполагал возможность объединения электромагнитных взаимодействий с гравитационными.
2. Оказалось, что электромагнитное и слабое взаимодействие связаны между собой. Так постоянная, определяющая величину слабого взаимодействия, оказалась связанной с зарядом электрона. В 1960-70-е годы была создана теория электрослабого взаимодействия.
3. Ведется работа над единой теорией сильного, слабого и электромагнитного взаимодействия.

Динамический вакуум – как источник полей и частиц

Динамический вакуум – невозбужденное состояние поля.

Флуктуации этого состояния приводят к порождению виртуальных частиц, время жизни которых $\sim 10^{-30}$ с. При определенных условиях они способны превращаться в реальные частицы.

С другой стороны при аннигиляции (латинск. (annihilatio - уничтожение исчезновение) пар некоторых элементарных античастиц возникают кванты силовых полей.

Динамический вакуум

Динамический вакуум – это пространство, заполненное случайно возникающими и исчезающими виртуальными частицами.

Виртуальные частицы оказывают влияние на поведение реальных частиц, особенно в ядерном веществе

Элементарные частицы

Под элементарной частицей в точном смысле этого слова понимают далее неразложимые частицы материи, из которых складывается ее структурная организация. Однако впоследствии было установлено, что большинство частиц, названных элементарными, имеют сложную структуру. Поэтому сейчас под элементарными частицами понимают **субъядерные частицы**.

Характеристики элементарных частиц (более 350 частиц).

Масса элементарной частицы — масса покоя, которая определяется по отношению к массе покоя электрона. Частицы с нулевой массой покоя движутся со скоростью света (фотон).

По массе элементарные частицы делятся на:

1. Тяжелые (барионы);
2. Промежуточные (мезоны);
3. Легкие (лептоны);

Самая легкая частица ненулевой массы - электрон.

Самая тяжелая Z - бозон обладает массой в 200.000 раз большей, чем у электрона.

Заряд элементарной частицы

Заряд элементарной частицы чаще всего кратен заряду электрона (-1), который рассматривается в качестве единицы. Однако, есть элементарные частицы, которые не имеют заряда, например фотон.

Спин элементарной частицы

Спин элементарной частицы — это собственный момент импульса частицы.

В зависимости от спина частицы делят на две группы: с целым спином (0, 1, 2) — бозоны, с полуцелым спином ($1/2$ и др.) — фермионы.

Электрон, протон, нейтрон имеют спин $1/2$, спин фотона 1.

Время жизни элементарной частицы

1. Стабильные (существуют длительное время).
Пример: фотон, нейтрино, протон, электрон.
В ядре стабилен нейтрон.
2. Квазистабильные (резонансные) (время жизни 10^{-22} с). Распадаются в результате электромагнитного и слабого взаимодействия.
3. Нестабильные (несколько микросекунд).
Большинство элементарных частиц нестабильно и распадаются в результате сильного и слабого взаимодействия.

По участию во взаимодействиях частицы делят на группы

1. Частицы, участвующие в сильном взаимодействии, — *адроны (нейтроны, протоны, барионы, мезоны)*.
2. Частицы, не участвующие в сильном взаимодействии, — *лептоны (электроны, нейтрино, мюоны)*.
3. Частицы — *переносчики взаимодействий (фотоны, глюоны, бозоны, гравитоны)*

Кварки

В опытах по рассеянию электронов на протонах и нейтронах обнаружено:

большинство электронов проходят через эти частицы, как через пустоту, а небольшая часть электронов рассеивается.

Вывод: протоны, нейтроны и др. адроны состоят из более простых частиц – кварков.

Теория кварков

Амер. физики Марри Гелл-Ман, Джордж Цвейг, 1964 г.

Основные положения теории кварков:

1. Адроны состоят из более мелких частиц — кварков.
2. Кварки представляют собой истинно элементарные частицы и поэтому бесструктурны.
3. Главная особенность кварков — дробный заряд.
4. Кварки различаются спином, ароматом и цветом. Аромат и цвет кварка - его особые физические характеристики.

Теория кварков

5. Каждому кварку соответствует антикварк с противоположным цветом (антикрасный, антизеленый и антисиний). Кварки соединяются тройками, образуя барионы (нейтрон, протон), или парами, образуя мезоны. Антикварки, соединяясь тройками, соответственно, образуют антибарионы. Мезон состоит из кварка и антикварка.
6. Кварки объединяются между собой благодаря сильному взаимодействию. Переносчиками сильного взаимодействия выступают глюоны, которые как бы «склеивают» кварки между собой.

Благодарю за внимание!

