

Лекция №6. ЗАГАДКИ ВСЕЛЕННОЙ: “ВЕЛИКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ”

Мы практически ничего не знаем о происхождении Вселенной. Мало что знаем о Земле. Об особенностях формирования климата, внутреннем строении, составе пород. Почему Мир именно таков, какого будущее этого Мира? Как формируется из неживого живое? Как работает клетка? Почему различаются симметрия живой и неживой природы? Бесконечная цепь вопросов. Разрешение одних ведет к появлению других...

Еще древние пытались построить мир из неких основных сущностей типа огня, воды, земли и воздуха. Затем возникло учение о неделимых атомах. Но было установлено, что они имеют сложную структуру. В начале 1930-х полагали, что есть только протоны, нейтроны и электроны. Но вскоре в космических лучах обнаружили позитрон (e^+), μ^\pm -мезоны и π^\pm -мезоны и постепенно число элементарных частиц приблизилось к 300. На сегодня истинно элементарными частицами являются *кварки и лептоны* (электроны и мезоны), а также *калибровочные бозоны* – переносчики взаимодействия (глюоны, промежуточные векторные бозоны, фотон и гравитон).

Современные достижения физики высоких энергий все больше укрепляют представление, что многообразие свойств *природы* обусловлено взаимодействующими элементарными частицами. *Взаимодействие* с точки зрения физики – воздействие тел или частиц друг на друга, приводящее к изменению состояния их движения. В механике Ньютона взаимодействие количественно характеризуется силой. Примеры сил: трения, упругости, тяжести, электрические, магнитные, ядерные и др. В безграничных просторах Вселенной, на нашей планете, в любом веществе, в живых организмах, в атомах, в атомных ядрах и мире элементарных частиц мы встречаемся с проявлением всего лишь *четырёх типов взаимодействий*. Эти взаимодействия называются *фундаментальными* т.е. самыми основными, исходными, первичными, не сводящимися к другим. В порядке возрастания интенсивности взаимодействия это: *гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное (ядерное)*.

Гравитационное взаимодействие открыто в XVII веке, электромагнитное – в XIX веке, слабое и сильное – в середине XX века.

Физике XVII века было известно только *гравитационное взаимодействие*. Мы постоянно ощущаем гравитацию в нашей жизни. Гравитация – (лат. gravitas – “тяжесть”) или тяготение, не очень существенна при взаимодействии между малыми частицами, но она удерживает планеты, всю Солнечную систему и галактики. Исааком Ньютоном в 1687 г. было установлено, что гравитационные силы прямо пропорциональны произведению масс и обратно пропорциональны квадрату расстояния между массами $F_{zp} = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$. В законе всемирного тяготения гравитационная

постоянная $G = 6,6745 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$. Впервые экспериментальное доказательство закона всемирного тяготения для земных тел, а также числовое определение гравитационной постоянной G проведено английским физиком Г. Кавендишем (1731—1810) на крутильных весах. По закону всемирного тяготения следует, что гравитационное взаимодействие распространяется мгновенно. Сегодня мы знаем, что это не так. Скорость распространения любого взаимодействия не может превышать скорость света в вакууме. Гравитационные силы действуют на все объекты Вселенной, от галактик до элементарных частиц. Однако это взаимодействие много слабее других и никак не проявляет себя в микромире.

Ньютоновская теория тяготения явилась величайшим достижением естествознания. Она позволила с большой точностью описать обширный круг явлений: движение планет Солнечной системы, предсказать существование таких планет, как Нептун и Плутон.

Простейшие электрические и магнитные явления были известны в древние времена – янтарь, потертый об шерсть, притягивал легкие предметы, куски железной руды притягивали железо и друг друга. Но только в 1600г У. Гильберт впервые разграничил электрические и магнитные явления. В XVII веке появилось понятие электрического заряда. Закон взаимодействия электрических зарядов (закон Кулона) был сформулирован в 1785г, опубликован почти 100 лет спустя! Г. Кавендишем. По этому закону

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$$
 сила электростатического взаимодействия зависит от универсальной постоянной – заряда электрона. Электрон (в переводе с греч. – янтарь), открытый в 1897г Джозеф Джон Томсоном, является материальной частицей, **носителем наименьшей массы и наименьшего электрического заряда в природе** ($e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$). Все электрические заряды кратны заряду электрона. Интенсивность электромагнитного взаимодействия зависит от так называемой постоянной тонкой структуры $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137 = 7,3 \cdot 10^{-3}$. Три фундаментальные постоянные – скорость света c , постоянна Планка \hbar и заряд электрона e связаны друг с другом!

Магнитные силы порождаются движением электрических зарядов, электрическими токами. Это стало ясно после фундаментального открытия в 1820 г. датского физика Х. Эрстеда, выявившего действие электрического тока на магнитную стрелку. В том же году А.М. Ампер открыл закон взаимодействия электрических токов. Мы знаем, что любой магнит имеет два полюса (условно “северный” и “южный”). Однако существуют теории, показывающие возможность полной симметрии электростатических (покоящиеся электрические заряды) и магнитостатических (покоящиеся магнитные заряды) взаимодействий. Неоднократные попытки экспериментального обнаружения магнитного заряда (магнитного монополя) не увенчались успехом. Особенно интенсивно поиски магнитного монополя космического происхождения проводились с начала 80-х годов XX века. В сентябре 2009 года сразу несколько независимых исследовательских групп объявило об обнаружении в твёрдом теле (спиновом льду из титаната

диспрозия $Dy_2Ti_2O_7$) квазичастиц, имитирующих магнитные монополи. Однако обнаруженные “монополи” являются квазичастицами, а не элементарными частицами, поэтому данное открытие не произвело переворота в физике элементарных частиц. Тем не менее “квазимонополи” интересны сами по себе и являются объектом интенсивных исследований.

Гравитационное и электромагнитное взаимодействия являются **дальнодействующими**, распространяются на всю Вселенную, а слабое и сильное взаимодействия проявляются только в пределах атомного ядра и являются **короткодействующими**.

Частицы, входящие в атомное ядро, протоны и нейтроны (обобщающее название – нуклоны), удерживающиеся **ядерными силами**. Т.е. сильное взаимодействие препятствует распаду атомных ядер, и не будь его, ядра распались бы из-за сил электрического отталкивания протонов. С этим типом взаимодействия связаны энергия, выделяемая Солнцем и звездами, превращения в ядерных реакторах и освобождение энергии. Природа этих сил стала ясна относительно недавно. Японский физик Х. Юкава в 1935 г. для объяснения **сильного взаимодействия** нуклонов предложил теорию мезонного поля, основанную на обмене нуклонов мезонами (обнаружены в 1947 г, имеют массу приблизительно равную $270 m_e$).

В отличие от электромагнитных сил ядерные силы действуют на расстояниях $\leq 10^{-15}$ м, где значительно превышают электромагнитные. Этим и объясняется малый размер ядра ($\sim 10^{-15}$ м) по сравнению с размером атома (10^{-10} м). Сильное взаимодействие существенно отличается от всех других взаимодействий: оно не только не уменьшается с увеличением расстояния (в пределах ядра), а наоборот, его сила растет по мере удаления кварков друг от друга, как будто они соединены пружиной. Даже если глюонную пружину, стягивающую, например, u и d – кварки в π^+ - мезон, разорвать, то, по современным представлениям, сразу найдется ещё одна пара кварк – антикварк, и в результате вместо одного мезона образуются два. Это напоминает попытку разделить северный и южный полюса постоянного магнита, разрезав его пополам. Как известно, в результате просто получатся два магнита. Сильные взаимодействия определяют течение ядерных реакций, особенно – термоядерного синтеза.

Слабое взаимодействие ответственно за многие ядерные процессы, например, за превращение нейтронов в протоны. Основные свойства слабого взаимодействия стали известны еще в 1931 г благодаря, преимущественно, работам Э. Ферми. Именно из-за слабого взаимодействия свободный нейтрон может существовать не более 10 мин и распадается на протон, электрон и антинейтрино с выделением некоторой энергии (1МэВ): $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$, т.е. через слабое взаимодействие одни субатомные частицы могут превращаться в другие.

В физике элементарных частиц предпринимаются попытки создания теории, объединяющей все известные взаимодействия в одно. Примером таких теорий служат: “**Теория Великого объединения**”, “**Теория всего**”,

“Стандартная модель” и др. Исторически первой подобной стала теория электромагнетизма, созданная Максвеллом в 1863 году. Затем в 1915 г. Эйнштейн сформулировал общую теорию относительности, описывающую гравитационное поле. Во второй половине XX столетия задача построения единой теории осложнилась необходимостью внесения в неё слабого и сильного взаимодействий.

В 1967 году Саламом и Вайнбергом была создана теория электрослабого взаимодействия, объединившая электромагнетизм и слабые взаимодействия. Позднее в 1973 году была предложена теория сильного взаимодействия (квантовая хромодинамика). На их основе была построена Стандартная Модель.

Одним из ярких достижений прошлого века стало доказательство того, что при очень высоких температурах (или энергиях) все четыре взаимодействия объединяются в одно. При энергии 100 ГэВ (100 млрд. эВ) объединяются электромагнитное и слабое взаимодействия образуя электрослабое взаимодействие. Такая энергия соответствует температуре через 10^{-10} с после Большого Взрыва. Это открытие сделанное в Европейском центре ядерных исследований (CERN) и позволило предположить, что при энергии порядка 10^{14} ГэВ можно достичь объединения с ними и сильного взаимодействия, а при энергии 10^{19} ГэВ и гравитационного взаимодействия. Однако в настоящее время невозможно искусственно создать условия для Великого объединения из-за фантастических энергий, требуемых для этого. Условия для Великого объединения могли существовать во Вселенной в краткий период сразу после Большого взрыва, т.е. около 13-14 млрд лет назад, когда её возраст составлял $10^{-43} - 10^{-36}$ с.

“Стандартная модель” объединяет три из четырех фундаментальных взаимодействий, исходя из представлений о единой природе сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий. Она предсказывает, что время жизни протона должно составлять $10^{30} - 10^{32}$ лет, нейтрино имеет малую ненулевую массу покоя, электрический заряд квантуется и существуют магнитные монополи. Экспериментальная проверка Стандартной Модели заключается в обнаружении предсказанных ею частиц и их свойств. В настоящий момент открыты все элементарные частицы Стандартной Модели, в том числе и хиггсовский бозон. Бозон Хиггса первоначально был предсказан в теории, и после нескольких десятков лет поиска 4 июля 2012 года представители ЦЕРН сообщили, что каждый из двух основных детекторов БАК наблюдал новую частицу с массой около 125-126 ГэВ. Есть веские основания считать, что эта частица является бозоном Хиггса.

В заголовке книги нобелевского лауреата Леона Ледермана (The God Particle: If the Universe Is the Answer, What Is the Question? (англ.)) она названа «god particle» (частица бога или частица-бог). Бозон Хиггса простыми словами пытались объяснить давно. В 1993 году министр науки Великобритании Вильям Волдгрэйв объявил конкурс на самое простое объяснение бозона Хиггса. Самой распространенной версией стала версия с вечеринкой. Чтобы понять, что такое бозон Хиггса, следует представить большую комнату, в которой проходит вечеринка. В определенный момент в комнату входит человек (например, рок-звезда), с которым все хотят пообщаться. Когда человек перемещается, за ним идет несколько гостей вечеринки – может показаться, что за ним идет скопление людей. При этом скорость движения рок-звезды ниже, чем у других гостей. Гости вечеринки сами могут объединяться в группы – если в толпе начнут обсуждать сплетню, то люди начнут передавать слух друг другу, образуя небольшие уплотнения.

Со стороны может показаться, что люди, обсуждающие сплетню, похожи на кучки гостей, обливающих рок-звезду, но без самой знаменитости. В этом объяснении все люди в комнате – это поле Хиггса, рок-звезда – частица, движущаяся в поле, а кучки людей, обсуждающих сплетню – это возмущение поля.

Бозон Хиггса - что дает? Нет, частица бога, которую нашел коллайдер, не поможет при создании вечного двигателя. Машина времени также не будет построена, хоть открытие частицы бога и произошло. Значение открытия имеет значение лишь для фундаментальной физики, для практики же пока нет. Кстати, многие боялись, что Большой адронный коллайдер вызовет конец света, но этого так и не произошло, так что последствия от открытия для простых людей, минимальны.

Тем не менее, Стандартная модель не может являться последним словом в физике элементарных частиц, ибо она содержит слишком много внешних параметров, а также не включает гравитацию. Поэтому поиск отклонений от Стандартной модели – одно из самых активных направлений исследования в последние годы. Ожидается, что эксперименты на Большом адронном коллайдере (БАК) смогут зарегистрировать множество отклонений от Стандартной модели.

Период 1980-х – 90-х ознаменовался бурным развитием **теории струн**, ожидалось, что в ближайшее время на основе теории струн будет сформулирована так называемая “Теория всего”, поискам которой Эйнштейн безуспешно посвятил десятилетия. Однако, несмотря на очень интересные подходы, развитые в последнее время, такие как, теории струн, петлевая квантовая гравитация, М-теория и др., проблема объединения всех фундаментальных открытий остается открытой. Надеемся, что только пока...

Теория струн — направление математической физики, изучающее динамику не точечных частиц, как большинство разделов физики, а одномерных протяжённых объектов, так называемых струн.

В рамках этой теории постулируется, что все фундаментальные частицы и их фундаментальные взаимодействия возникают в результате колебаний и взаимодействий ультрамикроскопических струн, длина которых составляет порядка 10-35 м (планковская длина). Данный подход, с одной стороны, позволяет избежать таких трудностей квантовой теории поля, как необходимость перенормировки, а с другой стороны, приводит к более глубокому взгляду на структуру материи, сил и самого пространства-времени, поскольку язык теории струн подходит для описания как микроскопического мира (область применения квантовой механики), так и макроскопического мира (область применения общей теории относительности).

Теория струн возникла в середине 1970-х годов в результате развития струнной модели строения адронов. Середина 1980-х и середина 1990-х ознаменовались бурным развитием теории струн, и ожидалось, что в ближайшее время на основе теории струн будет сформулирована так называемая «единая теория», или «теория всего», поискам которой Эйнштейн безуспешно посвятил десятилетия. В последние годы теория струн столкнулась с серьёзной трудностью, называемой проблемой ландшафта, суть которой состоит в том, что теория струн позволяет равноправное существование огромного множества различных вселенных, а не только той, в которой мы существуем. Тем не менее разработка теории струн стимулировала развитие математических теорий, в основном алгебраической и дифференциальной геометрии, топологии, а также позволила точнее понять структуру материи и квантовой гравитации.