

Естественнонаучная картина мира

Лекция №4

Тема №3. Уровни организации материи в природе

Понятие материи и энергии. Законы сохранения

До конца 19 века материю понимали только как вещество, из которого состоят все тела. Все эти тела располагались в некоем гипотетическом веществе – эфире, который занимает все пространство и везде проникает (во все поры тела). Электромагнитная картина мира оставила открытым вопрос о свойствах и структуре вакуума (т. е. о эфире). Это проблема распространения электромагнитных и гравитационных волн, так как волна распространяется в какой-то среде. Энергия рассматривалась как характеристика материи, выделялась механическая и тепловая энергия и энергия поля или волны. Были установлены законы сохранения каждой из энергий и варианты перехода одной энергии в другую с сохранением общего баланса при трении, термодинамических процессах, поглощении или излучении электромагнитных волн.

С появлением теории относительности и квантовой теории, утверждении дуализма волны и частицы, оказалось что поле, волна как и частицы тоже материальны. Более того из вакуума можно создать пары частиц материи и антиматерии, которые могут аннигилировать, т. е. превратиться снова в вакуум отдав энергию полю. Таким образом, энергия и материя взаимосвязаны и могут превращаться друг в друга, что следует из знаменитой формулы Эйнштейна $E=mc^2$. Кроме того, обычное вещество состоит из молекул, молекулы состоят из атомов, атомы из элементарных частиц. При этом местоположение и характеристика элементарных частиц в квантовой теории «размыты» в пространстве. Энергия и местоположение частиц не фиксирована, есть условие неопределенности Гейзенберга для них. В одних условиях частица ведет себя как частица, в других как распределенная во всем пространстве волна (волна Де Бройля). При этом остаются справедливыми законы сохранения энергии и вещества, которые необходимо объединить в один закон сохранения массы-энергии.

Пространство и время. Теории симметрии и относительности

До 20 века пространство понималось как абсолютная и равномерная сущность, свойства которого не зависели от свойств материи в пространстве и ее движения. Время также воспринималось как самостоятельная сущность, которая не зависела ни от пространства,

ни от материи в пространстве, ни от ее движения (абсолютное время, некоторый абстрактный абсолютный метроном, который отсчитывает время равномерно текущее и абсолютное для всех). Таким образом, принималось существование абсолютного пространства и времени, не зависящих от материи.

Появление специальной и общей теории относительности Эйнштейна позволило изменить эти представления:

Оказалось, что пространство, время и материя взаимосвязаны:

- свойства пространства и времени зависят от свойств материи, которая в них находится, и от ее движения;

- пространство и время взаимосвязаны и составляют *единое 4-х мерное пространство-время* (предложено Г. Минковским в 1908 году); объект, существующий в таком 4-х мерном пространстве-времени, дает проекции на воспринимаемые человеком измерения, которые, подобно тени от предмета, могут увеличиваться и уменьшаться при движении объекта; это определенным образом поясняет эффекты теории относительности по сокращению размеров тела и др.; сам 4-х мерный объект не меняется, но мы не можем воспринять его целиком.

Особое значение для физики имели законы симметрии пространства. Изначально казался очевидным однородность и симметрия направлений в пространстве, но реальные эксперименты показывают некие отклонения в таких законах. Была доказана неевклидовость космического пространства вселенной (сегодня ученые склоняются к Римановской модели космоса). Симметрия нарушается и в микромире, где были сформулированы особые законы симметрии для элементарных частиц.

Мегамир. Астрономия и строение вселенной

Исторически физики рассматривали законы для мегамира (космоса) и микромира (атомы и молекулы) тождественными. Однако, с появлением квантовой теории и экспериментальным изучением микромира стали накапливаться противоречия, которые не разрешены до конца и в настоящее время. Квантовые эффекты в микромире очень существенны, но для больших масс и расстояний эти эффекты не всегда можно оценить и явно выразить. Кроме того, в мегамире возможно существование экстремальных по величине энергий и полей. В физике выделены гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое взаимодействия материи. Каждое из этих взаимодействий доминирует на определенных размерах. В мегамире

наиболее важно гравитационное, а затем электромагнитное взаимодействие, сильное и слабое взаимодействия здесь имеют малое значение. Для микромира ситуация обратная. Есть попытки объединить эти взаимодействия (большое объединение), но пока эти теории еще не являются окончательно устоявшимися. Кроме того, проблемы описания реального мегамира привели к появлению теории «темных» энергий и материи, сущность которых пока не понятна. Есть проблема и существования таких экстремальных объектов как черные дыры, квазары, нейтронные звезды, где официальная физика иногда не может дать описания существующих там процессов.

Таким образом физика мегамира рассматривается как правило автономно в рамках наук Астрономии и Космогонии (науки о развитии космоса). Современная Астрономия выделяет следующие теории:

- Теория зарождения и развития вселенной.
- Структура вселенной, которая делится на звездные системы, звездные скопления, галактики, супергалактики (система связанных галактик).
- Физика суперобъектов вселенной — различные типы звезд, нейтронные звезды, пульсары, квазары, черные дыры.
- Физика не звездных объектов — планеты и планетоиды, газовые скопления, астероиды, метеориты, кометы, межзвездная пыль и межзвездные пространства.
- Физика космических полей и излучений.

Концепции зарождения, развития и структура вселенной

Теория зарождения и развития вселенной в настоящее время основывается на теории большого взрыва (хотя есть и альтернативные теории, например пульсирующей вселенной). В соответствии с теорией большого взрыва 13,77 миллиардов лет назад вся вселенная была сжата в одной точке сингулярности (где физика явлений не понятна), далее произошел сильнейшее расширение (взрыв), появление материи, формирование в начале элементарных частиц, затем атомов водорода, формирование водородных газовых скоплений, которые сжимаются с формированием звезд, планет и других объектов. Внутри звезд начинаются термоядерные реакции и формируются разные химические элементы. Эволюция звезд, сопровождается рядом этапов, в том числе вспышками (взрывами) сверхновых звезд с выбросом различных химических элементов в окружающее пространство, созданием нейтронных звезд, квазаров и черных дыр.

- Одновременно происходит расширение пространства вселенной и формирования таких звездных структур как галактики и скопления галактик (супергалактики). При этом продолжается «разбегание» галактик (красное смещение), скорость которого не уменьшается. Это заставило принять теорию «темных» энергии и вещества, которые и ответственны за ускоренное расширение вселенной.
- У каждой звезды формируются звездные системы, включающие планеты, астероиды и кометы. В настоящее время уже найдены планеты у других звезд и определены некоторые их характеристики. Наиболее хорошо известно строение нашей солнечной системы. Здесь выделен ряд объектов, которые признаны планетами. Планеты в порядке следования от Солнца: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун и Плутон (есть разногласия о том, считать ли его планетой) движутся вокруг Солнца по эллипсам, в одном из фокусов которого находится Солнце. Орбиты планет лежат в одной плоскости. Есть особые области: пояс Койпера и облако Оорта в котором располагаются различные объекты, признаваемые как астероиды (хотя некоторые из них подобны Плутону). Есть так же пояс астероидов между Марсом и Юпитером. Вокруг планет могут двигаться свои спутники (луны или планетоиды). Примеры: Луна у Земли, Фобос и Деймос у Марса, Ганнимед, Каллисто, Ио, Европа у Юпитера, Титан и Энцелад у Сатурна (и еще огромное множество других, образующих кольца Сатурна), Титания, Оберон и другие у Урана, Тритон у Нептуна. Некоторые астероиды имеют свои имена, некоторые просто обозначаются кодировкой. Астероиды составленные в основном из льда (замерзшие вода и газы), проходящие недалеко от Солнца получили названия кометы (из-за появления хвоста испарявшихся газов). Кометы часто хорошо видны с поверхности Земли и поэтому имеют свои имена (кометы Галлея, Энке, Биэлы).

Физические основы астрономических объектов. Гравитационное взаимодействие

Первое математическое описание гравитации дал Ньютон (классическая теория). Основываясь на работах астрономов (Кеплер и другие) он предложил формулу, которая сравнительно точно описывала законы движения небесных тел. В соответствии с *Ньютоновской теорией тяготения* сила взаимодействия 2-х тел определяется формулой :

$F = \gamma * M_1 * M_2 / R^2$ где γ — постоянная тяготения, M_1 и M_2 - массы тел,

R — расстояние между телами. Так как тела действуют друг на друга, то они начинают движение относительно центра масс этой системы. Это значит, что не просто Земля движется вокруг Солнца, но и Солнце движется вокруг центра масс. Но поскольку Земля много меньше Солнца, то их центр масс внутри Солнца. Тогда действие Земли на Солнце приводит к прецессии Солнца — постоянному движению Солнца похожему на вращение вокруг оси. Другие планеты тоже действуют на Солнце, особенно Юпитер, поэтому центр масс системы Солнце-Юпитер находится вне Солнца. Аналогично существенно взаимодействие в системе Земля-Луна с прецессией Земли, которая ускоряет ее вращение и уменьшает длину суток. Влияет прецессия и на приливы. Таким образом, для вычисления орбит планет нужно учитывать взаимодействие всех планет и Солнца, что делает орбиты отличными от круговых. С другой стороны закон Ньютона позволил рассчитать орбиту планет, при условии, что ее центростремительная сила равна силе притяжения к Солнцу и другим планетам. Фактически это дало метод расчета масс планет Солнечной системы. Зная силу притяжения тела на поверхности к Земле $F=m \cdot g$, g — ускорение свободного падения, можно вычислить так же массу Земли. Кроме того, оказывается ускорение свободного падения на Земле разное, в зависимости от расстояния от центра Земли и отличается от ускорения свободного падения на других планетах или Луне.

Недостатки и противоречия Ньютонической теории тяготения.

1. Ньютон предполагал *мгновенное* распространение поля тяготения в соответствии с принципом дальнего действия, а СТО утверждала, в соответствии с принципом ближнего действия, что *предельная скорость распространения любых взаимодействий есть скорость света*.
2. Ньютон рассматривал гравитацию и инерцию как *разные* по своей природе явления, хотя отмечался *странный факт равенства* гравитационной и инерционной масс, а также факт $g=const$, что объяснялось простым случайным совпадением.
3. Если равномерное прямолинейное движение относительно, то *почему не может быть относительным всякое движение?* Почему инерциальные системы отсчета выделены относительно всех других? Эйнштейн решил кардинально проблему в Общей Теории Относительности, он сказал, что *явления инерции и гравитации имеют одну природу*.

Основные постулаты ОТО.

1. Тяготение одинаково действует на тела, сообщая им одинаковые ускорения, независимо от массы, химического состава и других свойств тел ($g=const$ - это установлено еще Галилеем).

2. Принцип эквивалентности Эйнштейна: физические процессы в поле тяготения и в ускоренной системе в отсутствии тяготения протекают по одинаковым законам. Другими словами можно сказать, что нет абсолютного движения, а есть относительное движение тела и Вселенной, и создаваемое поле от этого движения можно рассматривать как инерционное (в одних системах отсчета) и как гравитационное (в других системах отсчета). Это и есть принцип эквивалентности тяжести и инерции. Природа этих сил едина. Не вдаваясь в сложную математику, отметим, что выполнение постулатов ОТО приводит к пониманию сил гравитации (инерции) как искривления 4-х мерного пространства-времени.

Создание ОТО стало возможным лишь после разработки неевклидовых геометрий Н. Лобачевским, Б. Риманом и др. В ОТО использовано Риманово четырехмерное пространство положительной кривизны. Кривизна пространства-времени создается источниками гравитационного поля. При этом тяготение определяется не только массой объекта, но и всеми видами энергии, присутствующими в системе. Другими словами, тяготение зависит не только от распределения масс в пространстве, но и от их движения, от наличия различных физических полей в пространстве. Это – распространение принципа эквивалентности массы и энергии из СТО в ОТО. Распространение поля тяготения (искривление пространства-времени) происходит подобно распространению волны со скоростью света. Материя в движении создает искривление пространства-времени, которое, в свою очередь, влияет на движение материи. Это определяет нелинейный эффект взаимосвязи материи, пространства и времени. Таким образом, пространство вселенной искривлено и имеет распределенное гравитационное поле, определяемое распределением материи и энергии (в том числе и движения) в этом же пространстве. С другой стороны, гравитация приводит к формированию и сжатию отдельных сгустков материи в виде звезд, планет и других объектов. Разница фактически определяется размером сгустка. Большие массы сжимаются так, что начинаются термоядерные реакции внутри — зажигаются звезды.

Во время жизни огненного светила происходит непримиримая борьба между разнонаправленными силами. К центру звездной массы

сжимает звезду из-за всех сил гравитация, стараясь превратить огненный огромный шар в футбольный мячик. Термоядерные реакции, кипящие в толще звездных масс и на поверхности, стараются разорвать светило на мелкие кусочки. При этом звезда является родителем многообразия химических элементов.

В процессе «выгорания» термоядерного топлива сжатие продолжается и происходит взрыв «новых» или «сверхновых» звезд. Разница этих взрывов в том, что «новая» звезда это только взрыв на поверхности и необратимого сжатия не происходит, если звезда не очень велика. После взрыва «сверхновой» звезда превращается в нейтронную звезду или черную дыру, в зависимости от ее первоначальной массы. Нейтронная звезда — вариант сжатия, когда плотность примерно соответствует (или чуть больше) плотности ядра атома. Поэтому в этой звезде ядра «плотно» упакованы и содержат только электрически нейтральные нейтроны. На поверхности нейтронных звезд возникает мощное магнитное поле и звезда быстро вращается. Таким образом, нейтронные звезды часто становятся пульсарами — источниками мощного рентгеновского или радио узконаправленного излучения.

Если масса ядра сверхновой превышает определенный предел, то сжатие приводит к появлению черной дыры. Черная дыра имеет такой размер, что ее радиус оказывается меньше радиуса сферы Шварцшильда. Это сфера, внутри которой даже фотоны не могут преодолеть силу гравитации. Таким образом, черная дыра будет совершенно темной и только вокруг нее будет светящееся кольцо, образованное излучающей горячей материей, которая ускоряется в направлении черной дыры. Черная дыра при этом является мощным «пылесосом» окружающей материи и одновременно сильным источником излучения. Есть факты поглощения черными дырами даже отдельных звезд. Наиболее мощно излучающие черные дыры получили название квазары (самый мощный источник излучения вселенной). Существует теория, что черные дыры являются центрами образования галактик.

Сингулярность пространства-времени: при скоростях, приближающихся к скорости света, и при сильном гравитационном поле пространство-время как бы сжимается в точку. Формально, с точки зрения ОТО, это места, где обрывается существование частиц и полей в обычной известной нам форме.

Экспериментальная проверка ОТО в космогонии.

1. Удалось рассчитать точнее орбиту Меркурия, чем это было ранее по уравнениям Ньютона. Меркурий – наиболее близкая к Солнцу планета и в 25 наибольшей степени испытывает воздействие Солнца и искривленного пространства вокруг него. Его орбита – эллипс, и он медленно поворачивается. Такое аномальное поведение Меркурия законы Ньютона описывали не точно, и лишь расчеты по ОТО дали точный результат.

2. Проверка искривления луча света при прохождении вблизи массивных тел. Экспериментально проверено с точностью ~ 6% во время полных затмений Солнца. Первые измерения были проведены в 1919 году английским ученым Эддингтоном во время экспедиции в Африке. На самом деле искривление видно в нашем трехмерном пространстве. В четырехмерном пространстве-времени луч идет по прямой геодезической линии, которая является кратчайшей для данного неевклидова пространства.

3. В 1929 году американский астроном Э. Хаббл обнаружил смещение спектров излучения звезд в сторону красного цвета («красное смещение»), что подтверждает модель расширяющейся Вселенной, так как это свидетельствует о удалении объектов. При удалении источника света от наблюдателя он воспринимает его более красным, при приближении – более фиолетовым.

Микромир. Молекулярное, атомное и внутриатомное строение материи

В основе представлений о микромире лежит атомистическая концепция о строении материи, которая впервые была выдвинута древнегреческим философом Левкиппом (ок. 500–440 гг. до н. э.). Он ввёл такие понятия, как «*атом*» и «*пустота*». Атомистические представления Левкиппа были конкретизированы, дополнены и развиты другим великим древнегреческим философом Демокритом (ок. 460–370 гг. до н. э.). Согласно гипотезе Демокрита в абсолютной пустоте окружающего пространства существует бесконечное число мельчайших неделимых частиц – атомов, которые имеют разнообразную форму и движутся в пустоте беспорядочно, иногда они сталкиваются и отскакивают друг от друга, но иногда сцепляются в разных положениях и сочетаниях, что означает образование вещей с разным качеством. Эпикур (341–270 гг. до н. э.) наделил атомы ещё свойством тяжести. Атомы вечны, а вещи, образованные из них, гибнут (разъединяются), но сами атомы остаются, они далее могут сцепляться в новых сочетаниях с образованием новых вещей и т. д.

Концепция атомизма получила дальнейшее развитие в XVIII веке в работах Дж.Дальтона (1766–1844), который принял атомный вес водорода за единицу и сопоставил с ним атомные веса других газов. Благодаря этому стали изучаться физико-химические свойства атомов. В 19 веке Д. И. Менделеев (1834–1907) построил систему химических элементов, основанную на их атомном весе. Кроме того, открытие броуновского движения клеток и микроорганизмов позволило впервые экспериментально доказать постоянное движение мельчайших частиц вещества, которые стали идентифицироваться как молекулы. Было доказано, что молекулы и атомы не одно и то же. В молекулу входит как правило несколько атомов, связанных валентной связью. Понимание валентной связи атомов в сочетании с периодической системой элементов позволило сделать важный шаг в развитии химии. Появилась возможность классифицировать элементы по типам (металлы, инертные элементы и т. д.), предсказывать наличие и химические свойства новых элементов (при заполнении таблицы элементов), классифицировать химические структуры (кислоты, щелочи, соли и т. д.), строить структурные модели как известных химических веществ, так и новых еще не синтезированных (особенно плодотворным этот подход стал для органической химии).

Дальнейшим этапом освоения микромира стало изучение структуры атома. Систематические исследования строения атомов начались в 1897 году благодаря открытию Дж.Томсоном (1856–1940) электрона – отрицательно заряженной частицы, входящей в состав всех атомов. В 1903 году Дж.Томсон, развивая идеи У.Томсона (лорда Кельвина) (1824–1907) о строении атома (У.Томсон в 1902 году предложил первую модель атома, согласно которой положительный заряд в атоме распределен в достаточно большой области, а электроны вкраплены в него, как «изюм в пудинге»), усовершенствовал модель атома. Атом по Дж.Томсону представлял собой положительно заряженный шар с вкрапленными в него электронами, суммарный отрицательный заряд которых по модулю равен положительному заряду шара (модель атома Томсона). Поскольку масса электрона приблизительно в 2000 раз меньше массы атома водорода, то предполагалось, что почти вся масса атома определяется массой положительного заряда. Опыты с прохождением алифа-частиц через металлическую фольгу в лаборатории Резерфорда показали, что атом почти полностью пуст. Это заставило Резерфорда перейти от модели «пудинга» к модели «солнечной системы», где

место Солнца занимает массивное положительное ядро, а электроны вращаются подобно планетам по своим орбитам. Плотность ядра при этом оказалась чрезвычайно огромной, что позволило сделать вывод о возможности сильного сжатия вещества и дало новые идеи о процессах и веществе внутри звезд (где очень высокое давление). Появилось понятие свободный электрон — электрон, который «оторвался» от своего атома. Так как для отрыва требуется энергозатраты, то получение свободных электронов требует использования особой энергии выхода электронов. Стали более понятны процессы, возникающие при поляризации, намагничивании тел и образовании токов (особенно в вакууме). Возникло понятие «электронный» газ.

При изучении спектров излучения различных веществ, проявилась зависимость их от атомного состава (т. е. каждый атом имеет свой спектр, структура которого зависит от химического элемента для этого атома). Например наличие водорода можно определить по спектру излучения молекулы любого вещества, в составе которой есть хотя бы 1 атом водорода. Это дало метод определения структуры различных веществ и объектов (в том числе и звезд). Стало ясно, что окислительного горения внутри звезды нет (объяснение свечения звезд как окислительной реакции горения было окончательно отвергнуто и была выдвинута идея само поддерживаемой ядерной реакции). Одновременно изучение спектра поставило вопрос о наличии квантовых эффектов в атомах.

Для объяснения квантовых эффектов в атомах датский ученый Н. Бор (1885–1962) выдвинул в 1913 году предложения о специальных оболочках или состояниях для электронов. В модели Бора электрон не может иметь произвольную орбиту и соответственно энергию выхода, а заполняет одну из существующих для данного ядра электронных оболочек. Если атом потерял электрон, то он ионизируется (превращается в заряженный ион). Изучение ионизации показало, что число электронов в атоме конечно и их можно пересчитать. Таким образом был вычислен положительный заряд ядра атома. Обнаружение положительно заряженной частицы — протона (который имеет заряд точно равный по абсолютной величине заряду электрона) позволило в модели Бора предположить, что ядро состоит из нескольких протонов. Измерение массы протона и сравнение с массой ядер различных атомов показало, что масса ядра больше. Была выдвинута идея о наличии в ядре еще и частиц без

заряда — нейтронов. Обнаружить в эксперименте свободный нейтрон оказалось гораздо сложнее чем протон или электрон, так как он не имеет заряда и не взаимодействует с электромагнитным полем. Но в конце концов нейтрон был обнаружен в 1932 году английским физиком Д.Чедвиком (1891–1974). В результате модель Бора точно характеризовала атом любого вещества набором протонов и нейтронов в ядре и наличием электронных оболочек, которые могут быть заполнены или нет. Атом у которого все оболочки заполнены химически инертен, наличие незаполненных оболочек определяет валентность и химические особенности элемента. Атомы с незаполненными оболочками могут связываться между собой заполняя оболочки «общими» электронами, образуется молекула вещества. Например атом водорода Н имеет 1 не заполненную оболочку, поэтому 2 атома объединяются в молекулу из 2-х атомов H_2 . Имея незаполненную оболочку водород химически активен и образует молекулы различных химических веществ, в которых он может обмениваться 1 электроном. Например кислород О имеет 2 не заполненные оболочки, поэтому образуется молекула H_2O — вода. Объединение электронов — энергетически выгодная операция, поэтому водород горит в кислороде выделяя энергию — тепло.

Таким образом модель Бора дала хорошее объяснение таблице Менделеева, валентности и химическим свойствам ее элементов, оказалась она довольно точной и для спектров излучения водорода. Однако спектры других веществ эта модель предсказывала неверно, ее необходимо было усовершенствовать. Кроме того, не было понятно почему вращающиеся вокруг ядра заряженные электроны не излучают электромагнитные волны. В тоже время возможно излучение, если энергия этой волны равна разности энергий оболочек или равна энергии выхода. Было очевидно, что простое представление о движении электрона по круговой оболочке не отражает реальность.

Модификация модели атома была сделана после создания полноценной квантовой теории поля и уравнения Шредингера для квантовых систем. Оказалось, что электроны, протоны, нейтроны имеют множество квантовых характеристик, которые определяют их поведение в атоме. В тоже время излучение или поглощение атомом энергии возможно только с помощью квантовых частиц — фотонов, бозонов и т. д. Особенности квантовых характеристик этих частиц так же влияют на процессы в атоме. Было доказано, что протоны и

нейтроны в ядре (общее название частиц ядра — нуклоны, подвид адронов, поэтому коллайдер называется адронным) взаимодействуют не с помощью электромагнитных полей, а особым видом взаимодействия. Взаимодействие адронов в ядре оказалось много сильнее электромагнитного (поэтому ядро не разваливается при отталкивании протонов друг от друга), поэтому оно было названо сильным. В тоже время, при увеличении расстояния между адронами сильное взаимодействие уменьшается гораздо быстрее электромагнитного и практически не влияет на молекулярном уровне. Поэтому сильное взаимодействие не сжимает все адроны вещества в одно ядро, как внутри нейтронной звезды. Помимо сильного внутри атома действует слабое взаимодействие, которое так же не чувствуется на молекулярном уровне. Все эти особенности делают квантовую модель каждого атома довольно сложной структурой, которая в настоящее время довольно хорошо описывает спектры излучения и поглощения элементов.