

Трубачев Олег Олегович

Конспект лекций

ИСТОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ФИЗИКИ

Конспект подготовил

Новиков Игорь Владиславович

Оглавление

Лекция 1. Введение	7	
Лекция 2. Предыстория физики	19	
Натурфилософия с элементами физического знания.....	22	5
Ионийская школа	22	
Пифагорейская школа	23	6
Элеатская школа	25	
Плюралисты.....	25	
Атомисты	26	7
Платон	27	
Евдокс Книдский	27	
Аристотель. Перипатетическая школа.....	28	2 билет, 8
Механика Аристотеля. Закономерности движения тел по Аристотелю	32	
Александрийский период	34	
Клавдий Птолемей	35	
Лекция 3. Научная революция 16-17 века. Возникновение экспериментального естествознания.....	39	12
Галилей (1564-1642). Создание новой механики	40	10
Конкретная деятельность	41	
Особенности деятельности	42	
Принципы новой механики.....	44	
Эванджелиста Торричелли.....	46	
Рене Декарт.....	46	4 билет 11
Христиан Гюйгенс	50	
Возникновение теории гравитационного взаимодействия	51	
Механика континуума (аэростатика и гидростатика)	53	13
Лекция 4. Механика Ньютона. Развитие механики после Ньютона	55	3 билет 14
Исаак Ньютон (1643-1727)	58	
Краткая биография.....	59	
«Математические начала натуральной философии».....	60	

Содержание «Математических начал натуральной философии»	62	
Введение	62	
Первый том – О ДВИЖЕНИИ ТЕЛ	65	
Второй том – ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ	68	
Третий том – СИСТЕМА МИРА И ПРАВИЛА РАССУЖДЕНИЯ В ФИЗИКЕ.....	70	
Развитие механики в 18-19 веке	72	15
Развитие аналитических методов механики	72	
Лапласов детерминизм и индетерминизм Пуанкаре	73	
Относительность в механике	74	
Лекция 5. 18 век – период «невесомых».	75	
Развитие физики электрических и магнитных явлений.....	79	16
События, предшествовавшие формированию парадигмы.....	79	
Формирование парадигмы	82	
Гипотеза $1/r^2$	84	
Развитие физики тепла	86	17
События, предшествовавшие формированию парадигмы.....	86	
Исследования по калометрии	88	
Парадигма учения о теплоте по Блэку.....	88	
Кинетическая теория тепла. Газы и атомизм	90	9
Причины упадка кинетической теории тепла после середины 18 века.....	93	
Лекция 6. Электродинамика дальнего действия и волновая оптика	95	18
Корпускулярная и волновая оптика 17 века.....	97	
Постоянные токи и электродинамика дальнего действия	98	15
Гальванический элемент. Постоянные токи	98	
Магнитное действие электрического тока	99	
Взаимодействующие токи Андре Мари Ампера	100	
Открытие закона Ома	101	
Электродинамика Гаусса-Вебера	102	
Развитие оптики до середины 19 века	104	17
Открытие конечности скорости света в астрономических наблюдениях	105	

Влияние движения источника света на оптические явления.....	106	
Измерение интенсивности света. Фотометрия	106	
Идеи Эйлера о природе цвета	107	
Интерференция волн Томаса Юнга, объяснение колец Ньютона и опыт Юнга в 1800 году	107	
Открытие поляризации при отражении света (1807)	108	
Оптика Френеля	108	
Формирование математической теории упругости и оптика Френеля.....	110	
Альтернатива Френеля	112	
Лекция 7. Концепция электромагнитного поля Фарадея-Максвелла	113	14
Исследования Майкла Фарадея в 30-50х годах 19 века.....	116	
Предпосылки и фон	116	
Майкл Фарадей (1791-1867)	116	
Джеймс Клерк Максвелл (1831-1879).....	119	
«О Фарадеевых силовых линиях»	119	
«О физических силовых линиях»:.....	121	
«Динамическая теория электромагнитного поля».....	124	
Экспериментальное объяснение теории Максвелла	124	13
Измерение диэлектрической проницаемости.....	124	
Отношение научного сообщества к теории Максвелла	125	
Теория Гельмгольца.....	126	
Генрих Герц	127	
Петр Николаевич Лебедев.....	129	
Последующее развитие теории.....	129	
Лекция 8. Формирование молекулярно-кинетической теории, термодинамики и статистической физики.....	131	
Утверждение химического атомизма. Физика газов.....	133	12
Физика тепловых явлений в первой трети 19 века. Формирование идеи сохранения энергии.....	135	11
Предпосылки возникновения идеи сохранения энергии	137	
Окончательное установление закона сохранения энергии.....	139	

Роберт Юлий Майер	140	
Герман фон Гельмогольц	142	
Роберт Джоуль	143	
Возникновение термодинамики. Карно, Томсон и Клаузиус. Необратимость физических явлений	145	10
Лекция 9. Формирование молекулярно-кинетической теории, термодинамики и статистической физики	147	
Возникновение молекулярно-кинетической теории в середине 19 века	150	9
Исследования Максвелла по МКТ в 60ые годы 19 века. Проникновение теории вероятности в физику	153	
Людвиг Больцман (1844-1906). Создание статистической физики	157	8
Ранний период деятельности Больцмана	157	
Утверждение и детализация МКТ Максвелла	158	
Равновесие неидеальных систем и твердых тел	159	
Релаксация к состоянию равновесия. Согласование с МКТ и вывод второго начала термодинамики	161	7
Ситуация конца семидесятых – начала девяностых годов 19 века. Кризисное развитие МКТ	163	
Статистическая физика Джозайи Уилларда Гиббса (1902)	165	
Дальнейшее развитие статистической физики	165	
Дальнейшее развитие физической кинетики	167	
Лекция 10. Электронная теория Лоренца. Возникновение СТО	168	
Электронная теория Лоренца	171	5 6
Деятельность Гендрика Антона Лоренца (1853-1928). Возникновение электронной теории	171	
Сферы применения электронной теории Лоренца	173	
Открытие электрона	177	
Электродинамика движущихся тел	178	
Анри Пуанкаре и электронная теория Лоренца	180	
Альберт Эйнштейн (1879-1955) и возникновение СТО	182	1 билет
1905 год – «К электродинамике движущихся тел»	182	

Механика специальной теории относительности	183	
Инварианты СТО, геометрия пространства-времени.....	184	
Лекция 11. Возникновение квантовой теории.....	186	
Теория теплового излучения. Начало квантовой теории	190	4 вопрос
Что было известно к 1900 году	191	
Деятельность Макса Планка.....	193	
Первый подход Планка к проблеме	193	
Второй подход Планка. Применение интерполяции и термодинамики.....	196	
Возникновение идеи квантов и ее применение	198	3 билет
Теория фотоэффекта. Идея кванта света (фотона)	198	
Фотоэффект	200	
Идея корпускулярно-волнового дуализма света.....	201	
Применение идеи квантов – новая механика	202	
Теплоемкость твердого тела	204	
Лекция 12. История строения атома. Возникновения квантовой механики	206	2 билет
Развитие теории строения атома.....	211	
Атомные модели	212	
Модель атома Бора	214	
Развитие правил квантования.....	215	
Адиабатический принцип и квантовые условия.....	216	
Принцип соответствия.....	217	
Создание матричной механики	218	1 билет
Вернер Гайзенберг	218	
Возникновение волновой механики.....	222	
Предметный указатель.....	225	

Лекция 1. Введение

Первым делом давайте обсудим цели и задачи курса истории и методологии физики. Надеюсь, что, по крайней мере большинство из вас хотят стать исследователями и создавать что-то новое в физике. Для этого нужно иметь представление о том, что такое физика и как она развивалась и продолжает развиваться. Очевидно, что бесполезно листать философские словари и пытаться оттуда понять, что такое физика и экспериментальное естествознание. Да, там будут написаны некоторые вещи, которые большинству из вас мало что дадут. Но, вопрос остается открытым.

Прошло 4 года вашего физического образования. Вы изучали сначала курс общей, затем и теоретической физики. И, казалось бы, должны все отлично знать. Но, тем не менее, у учебного курса есть особенности изложения материала в учебниках. Последовательность изложения должна подчиняться педагогическим целям. В то время как реальное развитие физики довольно косвенно входит в учебный курс. Из таких учебных курсов сразу выстраивается некоторая концепция развития физики, которая, вообще говоря, неправильная. В связи с этим возникает необходимость посмотреть на этот вопрос с реальной точки зрения.

Кун называет такую концепцию кумулятивной концепцией развития физики. Я бы добавил к этому определению слово «линейная». Основная идея довольно простая. Имеется современное состояние науки, изложенное в учебниках. Также в них вы можете найти портреты бородатых товарищей, которые в тот или момент истории что-то придумали, внесли какой-то вклад в развитие физики. Ньютон в динамике Ньютона, Галилей, Гюйгенс, и так далее. То же самое относится к другим разделам. Такой подход отличается тем, что он описывается хронологически. Может быть, в строгом порядке возникновения идей даже есть какая-то польза.

Но, как указывает Кун, при этом возникает концепция, так сказать, лженауки. Например, давайте вспомним, что была такая идея природа тепла, совершенно непохожая на то, что излагается в современных учебниках – концепция теплорода. Тогда, с точки зрения такого кумулятивного способа развития физики, получается некая лженаука. Разумеется, люди не сознательно хотели завести физику в тупик, а просто так получилось.

Далее, допустим, какой-то исследователь является отцом-основателем какого-нибудь важного физического закона, например, законом Ома. А если человек придерживался противоположного взгляда, то становится непонятно, как к нему относится. Такие нюансы тем и плохи, что физика развивалась совершенно не так.

На вопрос развития физики можно посмотреть чисто исторически. И примерно то же самое можно сказать и относительно того, что есть физика. Дело в том, что здесь тоже существует определенные штампы. И если вы хотите развивать физику (даже не только развивать, а просто использовать), то вы наткнетесь на эти штампы, которые тоже надо разрушать, если вы хотите докопаться до истины.

О каких штампах идет речь? Приведу пример такого. Везде говорят, что физика – наука экспериментальная, причем она устроена так, что речь идет о количественных экспериментах, в которых что-то измеряется. Кроме того, имеются какие-то математические соотношения. И дальше в дело идут индуктивные рассуждения, обобщающие экспериментальные исследования. И, наконец, из получившихся рассуждений формируются закономерности. Такой штамп люди формировали в значительной степени извне. Тем не менее, он очень популярен, так как, с одной стороны, такая позиция была очень популярна при возникновении современной физики (начало 17 века). С другой стороны, эта позиция рождается в том самом учебном процессе, в который вы вовлечены.

На самом деле, такая позиция не вполне правильная. Да, она вполне подходит для учебного процесса. Более того, эти черты, конечно, присущи физике. Но нельзя все к ним сводить. И некоторые контрпримеры, своего рода сомнения, которые мы постараемся привести в рамках нашего изложения, будут вам очень полезны.

Мы еще вернемся к общим концептуальным моментам и закономерностям, о которых говорил Кун. А пока, рассуждая о смысле изучения реальной физики, стоит отметить еще кое-что. Приведу личный пример. В свое время я в аспирантуре выполнил приличную работу. По окончании аспирантуры, будучи достаточно детально вовлеченным в «физическую кинетику», решил почитать труды Больцмана. И после внимательного прочтения работ я стал замечать, что даже автор предисловия к трудам Больцмана, являясь, видимо, специалистом в области истории физики, не понимает, что конкретно сделано у Больцмана. Ведь в особенность истории физики в том, что сам предмет изучения очень сложен. Человеку, который больше занимается философией, историей науки с точки зрения архивов, писем, трудно воспринимать формулы в больцмановских работах (достигающих в некоторых местах размера в несколько страниц). Он может отследить общие интерпретации и слова, но разобраться в этом довольно сложно. Такое различие между посылом предисловия и реальным содержанием работы произвело на меня сильное впечатление.

По мнению Куна, очень важно не просто рассматривать и оценивать вклад авторов, но и посмотреть, как ситуация воспринималась в том историческом контексте, в рамках дискуссий и концепций того времени. Это очень непросто.

Итак, наша цель – погрузиться в эту деятельность, в большинстве своем на примерах. Для начала я решил немного детальней остановиться на некоторых результатах, о которых говорил Кун, и сделать их костяком вводной лекции.

Сначала отметим нестандартность ситуации. Дело в том, что физика, как наука, с одной стороны, имеет корни в западной и древнегреческой античности, когда появились учения натурфилософов и понятие естественного знания. В то же время, как современная наука, физика возникла совсем недавно. Момент возникновения датируется приблизительно 1600 годом и связывается с деятельностью Галилея. Таким образом, мы видим, что у физики была предыстория, связанная почему-то с западной античностью. Более подробно эту предысторию будем обсуждать на следующей лекции.

Теперь поговорим немного о естественном позитивизме. Позитивизм, как система взглядов, возникает у любого человека, который изучает физику. Мы используем имеющиеся физические методы, проводим экспериментальные исследования, результаты которых мы обобщаем. Дальше мы пытаемся индуктивным путем создать какие-то выводы, обобщения. При этом, нам говорят, что сама концепция, как и общие законы (механики, статистической физики) были построены индуктивно. На самом деле это не так.

Как говорит Кун, развитие физики не было линейным, кумулятивным. Название его книги - «Структура научных революций» - выпущенной в конце пятидесятых годов 20 века, по сути, отражает эту интригу. Действительно, как вы знаете, деятельность Коперника, Галилея многие связывают с научной революцией в физике. Можно привести и другие примеры решительных переворотов, например, возникновение волновой оптики; события рубежа 19-20 века, когда возникла теория относительности и квантовая теория.

Но современниками это воспринималось как что-то аномальное, как существенное потрясение, которого быть и не должно, но случилось. И дай бог, чтобы такого больше не было. Кун же говорит, что все совсем не так. Что, на самом деле, для физики естественен неравномерный характер развития. И название его книги как раз и отражает эту основную мысль.

Кун придумал термин «*нормальная наука*», то есть такая наука, которая находится в линейной стадии развития. В связи с этим термином возник еще один – «*парадигма*», что с греческого переводится как «шаблон». Расширив это понятие, Кун утверждал, что парадигма формируется в течение некоторого периода времени. При этом сначала идет ранний период развития, допарадигмальный. «Нормальной науки» еще нет, но есть предварительное развитие. Этот период отличается тем отсутствием общей точки

зрения на то, как нужно излагать основы науки. А также тем, что народ публикует не статьи, а монографии.

Вспомним пример механики, 17 век. Было понятно, что сделал Галилей. Возникали труды Декарта, Гюйгенса и других авторов, которые представляли собой именно монографии, в которых решались замечательные задачи. Но не было устоявшихся систем положения науки. Заслуга Ньютона в том, что он эту систему довел до конца, создав парадигму.

Но претендовать на роль парадигмы может лишь замкнутая теория. Причем тут я бы дополнил Куна. Хорошая теория в физике должна быть устроена похожим на геометрию Евклида образом. Ведь особенность геометрии Евклида заключается в компактном наборе первых принципов. Именно из них можно развернуть массу теорем и задач, которые затем можно применять в разных ситуациях. Эти принципы, конечно, должны удовлетворять требованиям внутренней непротиворечивости и полноты.

Кстати, Томас Кун также включает в парадигму методы деятельности научного сообщества. А именно, возникновение самих научных сообществ, академий, научных журналов, способов публикаций, и так далее.

Итак, формирование парадигмы является точкой формирования «нормальной науки». Согласно Куну, этот период отличается тем, что народ публикует статьи. Статья от монографии отличается тем, что в ней вы добавляете что-то свое, и при этом необязательно начинать с самых основ квантовой электродинамики. Достаточно сказать, что Иванов опубликовал такую статью, Сидоров другую, а вы придумали что-то свое. Это и есть пример того, что подразумевал Кун под эпохой нормальной науки. Эти основы устанавливаются и существуют какое-то время.

Механика Ньютона, будучи первой парадигмой в физике, возникла в 1687 году. Но при этом любопытно дополнить Куна. Обратите внимание на существенную роль математики в трудах Ньютона. Математика, которая является основой классической механики, была создана самим Ньютоном. Он, наравне с Лейбницем, считается отцом-основателем математического анализа. Но стоит понимать, что работа Ньютона была основой, фундаментом. Более того, метод рассуждений Ньютона в его работах был сугубо геометрическим. Формализм дифференциальных уравнений в аналитическом виде появился лишь 100 лет спустя в работах Леонарда Эйлера.

Обсудим еще следующий момент. В физике, на самом деле, нам важна не просто математика, а математика на множестве решенных задач. Ньютон, грубо говоря, решил всего одну задачу – задачу Кеплера, или задачу двух тел. Если сила является функцией расстояния, то задача решается в общем виде, решение приводится в квадратурах. Для

той эпохи это было выдающееся достижение, на математическую сторону которого многие люди не обращают внимания.

Но Ньютон сразу увидел, что эта задача требует дополнения. При рассмотрении движения Луны возникает подход к уточнению решения других задач – задача взаимодействия нескольких тел. И, несмотря на то, что подходы Ньютона сейчас имеют чисто исторический интерес, его метод в последствии стали систематически разворачивать и получили теорию возмущений (уже в 18 веке). Когда рассматривали системы более сложные, чем атом водорода, именно на основе теории возмущений в значительной степени построили атомную физику.

Примерно то же самое возникает в Солнечной системе, когда вы рассматриваете движение различных планет. Нужно учитывать взаимные влияния друг на друга как известных видимых тел, так тех, которые могут быть еще не открытыми и невидимыми. В 19 веке, благодаря этому, открыли Уран и Нептун. Именно эти открытия «на кончике пера» произвели гигантское впечатление на общество. А решила ведь всего-то одна задача, дальше лишь шла теория возмущений.

Вплоть до конца 19 века никто не задумывался о том, можно ли эти возмущения прокручивать дальше. Потому что первые порядки давали впечатляющие результаты, а дальнейшие – требовали чрезвычайно сложных вычислений. Вроде бы все замечательно. И именно на фоне этих успехов как задачи двух тел, так и приближенных, итерационных алгоритмов с недоказанной сходимостью и точностью возникла концепция, которая потом и до сих пор оказывает гигантское влияние на научное сообщество – лапласовский детерминизм. Он основывается на том, что задача Коши – система дифференциальных уравнений с начальными состояниями системы – имеет в основном единственное решение.

Но ситуация начала меняться в конце 19 века. Анри Пуанкаре заложил определенные сомнения в сходимости системы теории возмущений. А затем, в 20 веке было доказано, что, в общем случае, обязательно возникают особые точки, приводящие к так называемому динамическому хаосу. Это открытие переворачивает основы интерпретации классической механики. При этом от самой классической механики никто не отказывается, становится другой лишь ее интерпретация. Некоторая неопределенность в классических системах оказывается выше, чем в квантовых системах.

Таким образом, мы должны учитывать математические выводы, полученные с конца 19 – середина 20 века. Суть это математики, созданной в основе в 17 веке, очень существенно изменилась. И поэтому делать методологические выводы из применения классической механики нам стоит очень осторожно, с оглядкой.

Завершим разговор про математику еще одним существенным моментом, который не всегда формулируется в общем виде. *Не любая математическая теория пригодна для того, чтобы быть основой физической парадигмой.* Потому что есть вещи, называемые математическим моделированием. И нужно четко понимать, где возникает различие.

Одно дело, когда удастся решение задачи хорошим или нет образом свести к первым принципам. И это и есть полноценное решение задачи. Доказательство при этом является экспериментальным. Но бывают ситуации, когда, проводя эксперимент, выполняя измерения и получая количественные результаты, вы формируете такую математическую модель, которая не сводится к первым принципам. Она, используя базовые положения, просто позволяет аппроксимировать некоторую ситуацию. Это не мейнстрим в развитии физики. Кстати, переход от птолемеевой системы мира к коперниковской тоже носил подобный характер. Это качественно другая конструкция, поэтому с этим событием и оказалось связано возникновение новой науки - физики.

Вернемся к Куну. Мы обсудили нормальную науку. Сказали, что существует как период нормальной науки, так и предварительный период. И после формирования парадигмы происходит деятельность в рамках нормальной науки. Но эта система не может сама по себе генерировать новые фундаментальные открытия. Она, скорее, более детально расширяет область применения первых принципов. И здесь мы можем позволить себе немного покритиковать точку зрения автора «Структуры научных революций».

Кун утверждает, что рано или поздно возникает ситуация, когда в уже существующую парадигму не внедряются новые результаты (например, экспериментальных исследований). Или возникают какие-то новые трудности, которые система не может преодолеть в силу своего консерватизма. При этом начинают возникать дискретные переходы от одной парадигмы к другой, которые Кун и назвал научной революцией. Примеров вы знаете достаточно много. Кун лишь здесь подчеркнул, что, по сути дела, эти ситуации достаточно стандартны, они часто встречается в истории науки.

Почему именно скачок? Дело в том, что возникающая новая парадигма не может лишь немного дополнять старую. Есть масса хороших примеров. Например, специальная теория относительности, 1905 год. Произошел переход («скачок») от механики Ньютона к специальной теории относительности. Вроде как, пример хороший. Но от одной теории к другой нельзя перейти плавно, потому что система основных положений СТО – это совершенно другая конструкция. И ее никак нельзя получить, лишь немного преобразовав базу механики Ньютона. Поэтому переход получается дискретный, с одной стороны. С другой стороны, ясно, что есть область, где

результаты похожи. Пример – медленно движущаяся частица, для которой СТО и механика Ньютона дают похожий результат. Но такая позиция иногда и портит жизнь. Здесь есть элемент дилетантизма.

Я пытаюсь этот момент объяснить студентам первого и второго курса на семинарах. Мне не очень нравятся разговоры про механику релятивистскую. Потому что тогда возникает представление, что, мол, была механика нерелятивистская, потом ее заменила механика релятивистская. Так можно говорить людям гуманитарного склада. Но человек, который занимается физикой, должен понимать, что, вообще говоря, в механике Ньютона и в релятивистской науке совершенно разные постановки задач. Поэтому мы часто даже не можем сравнить результаты решения одинаковых задач этими теориями, потому что ставить задачи надо по-разному.

Механика Ньютона – это задача взаимодействие тел. Должно быть несколько тел с дискретным числом степеней свободы. И другой механики взаимодействующих тел, кроме механики Ньютона, у нас до сих пор нет. Кстати, и сейчас эта механика расширила ареал своего применения. Если раньше это были вопросы космоса, ближнего космоса, звездных скоплений, то теперь это задача молекулярной динамики. Есть много систем, состоящих из молекул с конечными степенями свободы, и их взаимодействие вполне может быть классическое, а не квантовое.

Когда мы говорим о СТО, там задача другая. Есть единственное похожее применение – это электродинамика. Развитие 20 века показало, что для расчета взаимодействия заряженных частиц необходим учет релятивизма. Там возникают совершенно другие системы – системы частица-поле. Частицы, не взаимодействуя друг с другом, взаимодействуют с электромагнитным полем. А электромагнитное поле – это система с континуумом степеней свободы. Оно совсем не описывается механикой Ньютона. Поэтому сравнение такой задачи с задачей молекулярной динамики некорректно.

Таким образом, даже в рамках подхода Куна, говоря о научных революциях, все равно нет простого, линейного замещения одной теории другой.

Есть другой пример, касающийся природы тепла. С примитивной точки зрения, температура – это среднекинетическая энергия частиц. Но так говорить не очень хорошо. После курса статистической физики вы и сами можете покритиковать такое определение. Но в простейшем варианте, тепло – это скрытое движение частиц. А как же тогда лучистое тепло? И как можно механикой Ньютона объяснить лучистое тепло? В принципе, нельзя. И, соответственно, отсюда следует, что природа тепла имеет более сложную концепцию, чем простая кинетика. История развития тепла, поэтому, довольно сложная. В эпоху 19 века в рамках модели Максвелла-Больцмана строились

чисто кинетические конструкции. Но они все же неполноценны и не отвечают на некоторые вопросы о природе тепла.

Таким образом, мы обратили внимание на критические моменты. На сложности, возникающие при линейной, кумулятивной интерпретации развития физики. Вспомнили Куна и научные революции как скачкообразный переход от одной концепции к другой.

Сделаем еще одно замечание, касающееся истинности физического знания. Если следовать Куну, то получается так, что все парадигмы, теории – штуки относительные. С одной стороны, это хорошо, что мы так говорим. Мы с уважением относимся к эпохе 18 века, когда была очень распространена концепция теплорода. И мы не оцениваем это как тупик в развитии физики тепловых явлений, а с неким уважением рассматриваем как определенный этап. Да, в рамках этого этапа были получены определенные результаты. Изучая внутреннюю логику концепции теплорода, мы понимаем, почему эта концепция победила концепцию кинетическую.

С другой стороны, возникает так называемый теоретический релятивизм. Как это понимать? Допустим, была такая-то модель. При этом, оправдываясь словом «модель», мы можем говорить так, можем по-другому, и все будет правильно. Лишь бы получались грамотные предельные переходы, а полученные значения соответствовали каким-нибудь экспериментам. А уж что именно будем говорить, как будем описывать то же тепло, уже не важно. И к такому поведению, на самом деле, можно относиться критически.

Как видно из истории, в ряде случаев именно объяснение «как устроено изнутри» оказывается очень существенным. И такие объяснения явлений встают на первое место. Почему это так? Иногда трудно сказать. Мы видим, что, например, теория электромагнитного поля Фарадея-Максвелла возникла в значительной степени не из каких-то необходимостей согласования с экспериментом, а именно из того, что казалось не очень хорошим то объяснение явлений, которые было распространено в то время. И поэтому у Фарадея, а затем и у Максвелла возникла потребность преобразовать этот подход без, казалось бы, каких-то видимых оснований.

Далее, обсудим такой критерий теории, как ее устойчивость. Теория Ньютона существует 400 лет – не так много с точки зрения общей истории, но с точки зрения периода развития физики – очень большое время. И несмотря на это, нам не стоит отказываться от каких-то ее базовых положений. Такой релятивизм, который присущ некоторым подходам, требует аккуратного отношения к себе.

Главная проблема заключается в том, что (и это следует из истории физики) никогда не удавалось всё свести к одной теории. С одной стороны, очень хороши идейно-компактные теории, и вроде бы такие теории удавалось создать (например, классическая механика). Но в физике всегда присутствует несколько разделов. Ведь несмотря на то, что отцы-основатели пытались создать единую конструкцию, в итоге те же «Математические начала натуральной философии» описывают не всю физику, как хотел того Ньютон (он подразумевал под «натуральной философией» всю физику), а лишь ее часть. В то же время начинают развиваться, например, механика сплошной среды, механика континуума, и так далее. Ньютон пытался от них избавиться. И это, скорее, была неудачная часть его деятельности, как выяснилось потом. И спустя 150 лет механика сплошной среды стала очень активна развиваться. Поэтому, проблема, возникающая из-за неудачных попыток построить единую теорию всего, очень существенна.

Остается еще один момент. Когда мы говорим о внутренней закономерности развития физики, очень полезно было бы вспомнить и обсудить концепции Томаса Куна. Когда мы говорим о внешних влияниях, то важной темой является физика и философия. Скажем несколько слов на эту тему.

Если очень коротко говорить, то предыстория физики связана с западной античностью. В Древней Греции наука присутствует лишь в виде разных положений. Но самая близкая нам – древнегреческая натурфилософия – есть единая нерасширенная наука древности. Она пыталась логически и аргументированно объяснить окружающий мир, но при этом оставляла неразделенными вопросы, которые сейчас мы относим к сфере интереса философии. Сюда же относятся элементы физического знания, которые в большом количестве присутствовали у древних мудрецов и философов. Ведь слово «античная натурфилософия» демонстрирует интегральный характер этого знания.

Наша деятельность была бы невозможной, если бы не вспомнили о главном достижении античной натурфилософии. Речь идет о системе, возникшей у Аристотеля, который в значительной степени предвидел ту структуру науки, которая возникла потом. Причем он смог это предвидеть на довольно бедной базе. Это является одной из причин, по которым мы должны относиться к Аристотелю с чрезвычайным почтением и уважением, а также внимательно изучать основные положения его теории. Потому что, в идейном смысле, именно из концепции Аристотеля возникает та физика, то современное естествознание, которое мы сейчас имеем. Но при этом, как таковой, настоящей физики тогда и не было. Но огромное количество положений, которые мы относим к «элементам» физического знания, возникло именно тогда.

Дальше идет рубеж 16-17 века, деятельность Галилея. В этот момент возникает физика в современном смысле. Тут же возникает разделение на отдельные области

человеческого знания – физика и философия. Дело в том, что сам Галилей публиковал сугубо конкретные труды. И несмотря на то, что, по выводам, следующим из его трудов, делались различные философские и методологические утверждения, сам Галилей философией почти не занимался и свой метод абстрактно не формулировал. Де-факто возникает экспериментальная физика в современном смысле, и в этом имеет место консенсус в трудах тех людей, которые интересуются методологией физики.

Но возникает некая проблема. Потому что есть люди, которые непосредственно занимались физикой. А есть люди, которые все-таки больше были склонны к философским обобщениям и предавали очень существенное значение развитию этой новой науки, но все-таки смотрели на нее со стороны. И здесь возникает определенная оценка физики со стороны философов. Сначала эти оценки были более осторожными. Но, тем не менее, в 17 веке возникает идея индуктивных наук.

Поясним этот момент подробнее. Метод физики довольно прозрачен. Просто откинули ненужные схоластические методы средневековой науки, обратились к эксперименту, математике, к количественным исследованиям. И этот принципиально понятный метод и есть новая наука. В 18-19 веках было распространено мнение, что метод новой науки более-менее понятен. Его можно оценивать и он довольно эффективно показывает себя.

Но сразу же возникли и другие влияния – внешние влияния. Влияния людей, которые оценивали метод новой науки другим образом. Они обращали внимания на «доопытные» аспекты. Часто это называют метафизикой. Такие люди считали, что все в природе (в том числе и результаты эксперимента) в значительной степени определяются исходным положением, мировоззрением исследователя. Какими-то моментами в его картине мира, которые не связаны непосредственно с самим экспериментами, а позиционируются до эксперимента, до выводов из физических измерений – то, что нередко называют метафизикой. К таким людям относился человек, который и сам много сделал в физике и математике – Рене Декарт. Обратите внимание, мы часто будем возвращаться к Декарту и его последователям, которые называются картезианцами. А вопрос про противостояние картезианцев и ньютоновцев обязательно будет в билетах на экзамене.

Тем не менее, в 17 веке возникают различные подходы. Появляются новые сторонники экспериментального метода, физической индуктивной науки, которую можно оценивать со стороны. Были и противники такого подхода, которые говорили о значимости доопытных, метафизических конструкций. И между ними возникает определенная борьба.

Ситуация меняется в 18 веке. В то время значимость естественнонаучных исследований становится всем очевидной и привлекает общее внимание. При этом философы продолжают пытаться построить общую картину мира. Если вы изучали философию Гегеля и читали его труды, то можете там увидеть некие варианты новой натурфилософии. Некоторые философы еще в начале 19 века пытались, находясь вне физики, создавать картину природы и окружающего мира своим, нефизическим способом.

Но становилось все более очевидно, что это неуспешный подход. В то время физика развивалась очень успешно. И здесь наступает вторая половина 19 века. Это эпоха утверждения позитивистского подхода. Здесь под словом «позитивизм» я подразумеваю философскую группу направлений, куда можно отнести эмпириокритицизм Маха и другие учения, которые совершенно по-другому (со стороны философии) подходили к развитию физики. Позитивисты крайне отрицательно относились к тому, что сейчас называют метафизикой. К тому, что не следовало непосредственно из эксперимента. Они говорили, что физика сама себе философия. Что не нужна никакая дополнительная конструкция, а метод совершенно очевиден. Физики его знают и прекрасно используют.

Но при этом возникают отклонения. И роль философии заключается в критическом анализе конкретных физических исследований. В таких замечаниях, как «вот здесь есть какие-то положения, которые являются метафизическими, и поэтому должны быть отброшены». Возникает понятие «наблюдаемая величина», которое акцентирует внимание на том, что именно мы должны что-то наблюдать, что можем измерить, и только с этим иметь дело. И роль философии сводится к оптимизации метода. К тому, что мы должны убрать всю метафизику, связанную с величинами, которые не наблюдаются.

Такой критический анализ привел к нескольким последствиям. Эти последствия стоит упомянуть. Есть положительный пример, связанный с развитием классической механики, и отрицательный пример, связанный с идеей атомизма и статистической физикой.

Если говорить о влиянии философии на развитие физики, то наиболее ярким позитивистским направлением той эпохи является учение Маха. И это влияние на развитие классической механики оказалось довольно положительным. Простой вопрос – вы все со школы учили, что есть ИСО. Но, на самом деле, это понятие возникло не у Ньютона. Анализ последователей эмпириокритицизма Маха показал, что абсолютная система отсчета в механике Ньютона – не особо нужная вещь. Класс инерциальных систем отсчета придумал Людвиг Ланге, ученик Маха, в 1881 году. Это пример философского влияния на развитие физики.

Есть другой пример. Замкнутая физическая теория не должна обладать никакими противоречиями, которые могут ее изнутри разрушить. В 1870 годах выяснилось, что именно по этой причине нехороша теория электромагнетизма Гаусса-Вебера. Подробнее об этой теории поговорим позже. Сейчас лишь упомянем, что в этой теории были силы, зависящие от ускорения. А это нарушает структуру механики Ньютона. Кстати, это было главным аргументом Гельмгольца, который понял, что теория Гаусса-Вебера не годится и нужно придумать что-то другое. Тем самым Гельмгольц натолкнул Герца на поиск альтернативной теории. Как следствие, Герц стал проверять и уточнять теорию излучения электромагнитных волн. Тоже позитивный пример.

Но есть ужасный, негативный пример, который затрагивает взаимодействие Маха с Больцманом, Максвеллом – в общем, с молекулярно-кинетической теорией. Сложилась следующая ситуация. МКТ, на самом деле, была создана достаточно давно, в шестидесятые-семидесятые годы 19 века. Она развивалась в трудах Максвелла, а затем и в трудах Больцмана. В этих работах было много чего получено, например, кинетическое уравнение Больцмана, Н-теорема и много всего другого.

Но, во-первых, было очень мало получено конкретных новых результатов. Во-вторых, сама по себе теория получалась очень сложной. К тому же, сразу были найдены внутренние противоречия. И при этом вся теория основывалась на атомах и молекулах, которых и близко в середине 19 века никто не видел. По этим причинам Мах подвергал работы Больцмана чрезвычайной критике. Он писал о том, что есть замечательная наука – термодинамика – которая прекрасно согласована с опытом. Больцман, по его словам, развил сложную теорию, из которой ничего не получается, и которая основана на метафизических конструкциях – атомах и молекулах.

К несчастью для Больцмана, получалось так, что длительное время (1879 год) он не получал ничего нового, в то время как критика только нарастала. В итоге Больцман покончил жизнь самоубийством. И он сделал это не на пустом месте, а в значительной степени из-за кризиса теории. Причем это произошло практически в тот год, когда появились первые подтверждения молекулярно-кинетической теории (эйнштейновская теория броуновского движения). В конце концов, ситуация переломилась. Вот такой трагическое окончание получилось в результате вроде бы правильного методологического анализа.

Поэтому будем последовательно изучать развитие физики на тех примерах, которые предусмотрены программой.

Лекция 2. Предыстория физики

План лекции:

- Западная античность – предтеча физики
- Идея естественных закономерностей в природе

Натурфилософия с элементами физического знания

Ионийская школа:

- Фалес Милетский (640-550 до н.э.). Начало всех вещей – вода.
- Анаксимандр (610-547 до н.э.). Качественно неопределенное первовещество.
- Анаксимен Милетский (около 550 до н.э.). Первовещество – воздух.

Элеатская школа:

- Доказательные рассуждения и законы бытия.
- Парменид (5 век до н.э.). Против ионийского учения о развитии. В природе – неизменное единое сущее начало.
- Зенон. Апории Зенона:
 - о летящей стреле – движение не есть сумма состояний покоя.
 - Ахиллес и черепаха.

Плюралисты:

- Эмпедокл из Агригента (492-432 до н.э.). В основе всего – 4 стихии. В природе нет возникновения того, что может умереть.
- Анаксагор (500-428 до н.э.). Соединение и разъединение мельчайших частиц материи. Гомеомерии – «семена всех вещей» - бесконечно делимы и обладают всеми качествами целого тела.

Атомисты:

- Левкипп и Демокрит (460-370 до н.э.):
 - Основатель философского атомизма. Все тела состоят из атомов. Решали проблему возникновения.
 - Идея одновременного существования в мире бытия и небытия.
 - Регулярность движения атомов.
 - Движение присуще атомам от века; зрение обусловлено падением на глаза мелких атомов от светящихся предметов.
- Эпикур (341-270 до н.э.). Самопроизвольное случайное движение атомов.
- Лукреций Карр (96-55 до н.э.). Поэма «О природе вещей».

Платон (429-347 до н.э.):

- Геометрический атомизм. 4 стихии – 4 правильных многогранника. Элементы огня имеют форму тетраэдров, элементы воздуха – октаэдров, воды – икосаэдров, земли – кубов. Роль додекаэдра – пока смутная.

Евдокс Книдский (408-355 до н.э.):

- Ученик Платона. Объяснение для движения планет.
- Евдокс предлагает систему гомоцентрических сфер для объяснения движения планет.
- Земля покоится в центре вселенной. Планеты следуют друг за другом в расстояниях, соответствующих гармоническим отношениям тонов.

Аристотель (384-322 до н.э.). Перипатетическая школа:

- Аристотель создал первую последовательную философскую и натурфилософскую систему.
- Аристотель использовал четкую логическую конструкцию (четкие определения, понятия, законы, логические построения).
- Систематизировал представление о причине.
- Использовал термин «физика».
- Из физических сочинений Аристотеля известны следующие: «Физика», «О небе», «О метеорологии», «О рождении и разрушении», «Механические проблемы».

Специфические основы картины мира Аристотеля:

- Не существует пустоты.
- Непрерывность вещества. В пустом пространстве движение невозможно.
- 4 противоположных начала, образующих 4 элемента: тепло-холод; сухое-влажное. Жаркий и сухой – огонь, жаркий и влажный – воздух, холодная и влажная – вода, холодная и сухая – земля.
- Начала и тела легки или тяжелы по природе.
- Земля – истинно неподвижное тело. Но кинематика «Физики» допускает относительность. Земля шарообразна.
- Из природной тяжести и легкости начал следует, что вода не может быть тяжелой по отношению к земле, а воздух – к воде. Следовательно, вода не может производить давление на землю, а воздух – на воду. *Horror vacui*.

Механика Аристотеля:

Движения:

- Естественные. Движения снизу вверх и сверху вниз естественны для тел и продолжаются до насильственного прекращения.
- Насильственные. Все остальные движения тел у Земли.
- Движение небесных тел в надлунном мире. Идеальное, совершенное движение тел, погруженных в эфир.

Александрийский период – период эллинизма, период «математической физики» (300 до н.э. – 2 век н.э.). Отделение математики от философии.

- Эпикур (341-279 до н.э.). Последователь Демокрита. Самопроизвольное случайное движение атомов.

- Лукреций Карр (96-55 до н.э.). Атомист. Из его «О природе вещей» мы узнали подробности древней атомистики.
- Евклид (300 - ?? до н.э.). «Оптика», «Катоптрика». Геометрическая логическая схема рассуждений.
- Архимед (287 -212 до н.э.). Математические методы. Вершина античной статики. Основатель гидростатики.
- Герон Александрийский (150 до н.э.). Принцип наименьшего пути для лучей и плоского зеркала.

Клавдий Птолемей (70-147 н.э.):

- Родом из египетской Птолемаиды. Жил в Александрии.
- «Общий обзор», содержащий в тринадцати книгах – все достижения древней астрономии. «Альмагест». Звездный каталог.
- Аргументация в пользу геоцентризма, обращенная к динамике.
- Эксцентрический окружности, эпициклы и деференты.
- Оптический трактат «Opticorum sermones quinque». Собраны все оптические знания, причем Птолемей дополняет их самостоятельными исследованиями – описание эксперимента по выявлению закона преломления.

Упадок древней физики (150-700 н.э.)

Средние века (7-15 века)

Сегодня мы затронем 2 вопроса. Во-первых, начнем разговор о современной периодизации развитии физики. Во-вторых, поговорим о самом первом периоде, который называется «предысторией физики».

Почему предыстория? Есть такие моменты, которые мы с вами будем воспринимать без доказательств, лишь ссылаясь на какие-то традиции, и делать это мы будем по ряду объективных факторов. Так, традиционно считается, что физика, как наука в современном смысле, появилась примерно в 1600 году, и причиной тому стала деятельность практически одного человека – Галилео Галилея. Весь период до этого момента называют «предысторией». Но подробно обсуждать эту предысторию нам достаточно тяжело, поэтому будем выделять основное.

А основным здесь является тот факт, что эта предыстория завязана на западной античности. В первую очередь, здесь подразумевается древнегреческая натурфилософия, о которой мы сегодня и поговорим. Традиционно, она считается предтечей физики и современного естествознания вообще.

Если рассуждать качественно, то изучение философии есть изучение истории философии. А в рамках западной античности, древнегреческая наука - это единая натурфилософия. Многие моменты, связанные с историей этой науки, вы должны знать

и без меня. Тем не менее, существенные для нас моменты мы все же вспомним и обсудим.

Натурфилософия с элементами физического знания

Введем сегодня несколько подэтапов. Первый из них, включающий в себя идея философов от Фалеса до Аристотеля, мы назовем *этапом формирования древнегреческой натурфилософии*.

Во-первых, необходимо подчеркнуть, чем отличалась наука древнего мира, натурфилософия, от систематизированных знаний в других культурах. А отличалась она, в первую очередь, тем, что в ней шла речь об аргументированном знании. Если мы будем рассматривать разные древние культуры, то увидим, что в них достаточно часто имели место глубокие представления о каких-то закономерностях окружающего мира. Но эти представления в основном базировались на идеях какого-то сокровенного знания, откровения и мистики. В этом смысле, они вряд ли могли служить основанием и предтечей физики. В то время как знания натурфилософии, формирующиеся в западной античной культуре, были совершенно другой наукой, основанной на аргументированной системе знаний.

Ионийская школа

Здесь есть несколько моментов, которые, возможно, вам хорошо известны. Например, *ионийская школа*, которая появилась в 7 веке до нашей эры. Традиционно считается, что ионийская школа является первой общеизвестной натурфилософской школой, в которой можно найти целый ряд очень важных положений. Возникнув раз, они потом переходили от одного античного мыслителя к другому.

Основной идеей здесь была *идея единства окружающего мира*. Основателем этой школы является Фалес Милетский. Он был легендарной личностью, как и другие древние натурфилософы. Их труды напрямую до нас не дошли, но остались косвенные упоминания и пересказы в трудах ученых более позднего времени.

Фалес Милетский считал, что началом всех вещей является вода. Он пытался объяснить все многообразие окружающего мира из идеи его материального единства. Он считал, что есть единое начало, которое может по-разному перемещаться, существовать. Его идеи каким-то образом развивались, преобразовывались. Анаксимандр, ученик Фалеса, вводил единое первовещество – апейрон. Анаксимен считал, что таким веществом является воздух. Мы не будем подробно обсуждать эти концепции.

Пифагорейская школа

Далее упомянем *пифагорейскую школу*. Ее основатель, Пифагор Самосский, был младшим соплеменником Фалеса. Но он придумал совершенно оригинальную систему, которая очень сильно отличалась от того, что было известно до этого. У пифагорейцев были свои, совершенно особенные взгляды, некоторые из которых представляют большой интерес.

Так как наша наука произошла именно из западной античности, то впоследствии (в Новое Время) многие ученые ссылались именно на античные идеи. Вы должны знать происхождение этих идей. В частности, мы понимаем, что современная физика есть наука, основанная исключительно на количественных математических закономерностях, в которых роль чисел крайне существенна. Идея пифагорейцев заключалась в том, что именно число является единой основой всего мира (а не вода, воздух и т.д.). Причем не в том смысле, что все окружающее – это какие-то числа, а в том, что те закономерности, которые можно наблюдать, управляются числами и числовыми соотношениями.

Полезно знать примеры. Самый яркий, просуществовавший очень долго пример представляет собой струнные музыкальные инструменты, которые были распространены в Древней Греции. При этом из этих инструментов можно было извлечь как неприятные сочетания звуков струн, так и гармоничные сочетания, долговзвучные и очень красивые. Именно пифагорейцы первыми обратили внимание на то, что речь идет о простых, кратных отношениях длин этих струн, дающих гармоничные аккорды. Эти отношения не могут быть любыми. Они представляли собой кратные отношения, вроде 3 к 5 (не очень большие целые числа). И эти простые кратные отношения дают гармонические звуки.

Вторая идея, предложенная пифагорейцами, была связана с устройством ближнего космоса. Вряд ли можно доказать, что именно пифагорейцы первыми выдвинули идею о том, что Земля есть шар. И, в отличие от Аристотеля и многих других древнегреческих ученых, они ставили Землю на одну позицию с другими планетами. Тогда наблюдались как неподвижные звезды, согласованно перемещающиеся по небосводу, так и планеты – тела, которые движутся по сфере неподвижных звезд по своей траектории. Солнце и Луну считали особыми телами, но относили к планетам.

Все эти тела пифагорейцы ставили на один ряд. Впервые была высказана мысль о том, что Земля – такая же планета, как и остальные, движения которых мы наблюдаем. Известных планет было не так много. А так как у пифагорейцев наиболее

благоприятным числом считалось число 10, то они говорили, что планет должно быть тоже 10.

Кстати, еще один момент. Они считали, что планеты движутся по определенным хрустальным сферическим поверхностям и при этом издают гармоничные звуки, тем самым привязывая движение планет к первому пункту.

И все же десяти планет было слишком много для того времени. Небесных тел, с учетом Луны и Солнца, было известно 8. Пифагорейцам не хватало двух позиций. Поэтому они, во-первых, утверждали, что в центре мира имеется некий центральный огонь (и это не Солнце), а все остальные тела движутся вокруг этого центрального огня. А во-вторых они положили, что есть еще одна Земля, которую мы не видим, потому что она находится с другой стороны центрального огня от Земли. Таким образом, мы видим, что, с одной стороны, аргументация была. С другой стороны, она была выше, чем сами наблюдаемые факты.

Эти мысли и потом встречались часто. Сейчас часто говорят о том, что предтечей Коперника был Аристарх Саморский, который говорил о движении Земли. Но он лишь относился к пифагорейской школе. Поэтому, вообще говоря, идея о движении Земли вокруг Солнца была пифагорейской.

Дальше стали развиваться различные идеи в древней античной натурфилософии. Она стала развиваться и как философия, и как система взглядов на природу.

Еще важный момент. Мы сразу сказали, что античная наука была аргументированным знанием, в противоположность мистическому знанию, распространенному в странах Востока. Что такое есть аргументированность? Сейчас мы под этим понятием подразумеваем такую систему, которая свойственна современным естественным наукам, физике и математике (хотя и математика не является естественной наукой, она принадлежит особой области нашего знания). При этом имеется компактный набор первых принципов (как в геометрии Евклида), и дальше из них логически решаются задачи, доказываются теоремы, выводятся свойства объектов, включенных в теорию. При этом используются законы логики.

Но такая схема появилась не сразу. Да, идея о единстве материального мира появилась еще у Фалеса, но идеи доказательных рассуждений и выводы закономерностей получили свое развитие только в последующих натурфилософских школах. Упомянем две из них, элеатскую школу и школу плюралистов.

Элеатская школа

В обеих школах существенно развивалась логическая компонента. Например, Парменид из *элеатской школы* в своем учении отводил существенную роль некому единству бытия. Поэтому он отрицал существования небытия и, как следствие, идея развития ему была противна. Как что-то может развиваться, если все сущее уже и так в мире есть?

Далее, важным моментом в развитии логических методов рассуждения стали знаменитые и известные вам апории Зенона. Апория – это такое утверждение, которое показывает внутреннюю противоречивость понятий, которыми мы пользуемся. Часть из них было связано с тем, что мы сейчас относим к физике, и, особенно, к движению. Я решил упомянуть две апории, которые показывают внутреннюю противоречивость рассуждений о движении – апория о летящей стреле и апория об Ахиллесе и черепахе.

Первая из них вполне актуальна и в наше время. Сейчас у нас развита теория множеств. Но что такое движение? Многие могут сказать, что это множество состояний покоя, в каждом из которых стрела последовательно занимает положение в пространстве. Но, на самом деле, Зенон показывает, что такое описание движения стрелы довольно противоречиво. И сейчас, если подойти более глубоко к рассмотрению движения тел, например, в механике Ньютона, то мы увидим, что движение тела есть его особое состояние. Ньютоновский метод описания движения вам хорошо известен, там используются такие понятия, как мгновенная скорость, траектория, закон движения. Но, тем не менее, такое рассуждение и демонстрация внутренней противоречивости реальных задач, связанных с описанием движения, возникает еще в античности.

С Ахиллесом и черепахой дела обстоят проще. Тут все дело в противоречивости утверждения, что время течет само по себе. Зенон не очень понимал, что, строя свою последовательность и деля интервал времени пополам, он получает сходящуюся последовательность. А течению времени на эту сходимост все равно. Поэтому здесь противоречие не особо серьезное. Но все равно, эти апории Зенона в развитии описания движения сыграли существенную роль.

Плюралисты

Дальше, вопросами о строении вещества занимались *плюралисты*. Они считали, что есть определенный набор начал или стихий, из которых состоит вся окружающая действительность. Плюралисты также придерживались представления о том, что возникновения и уничтожения не существует. Но все состоит не из одного начала, а из 4 стихий. И эта идея 4 стихий очень долго присутствовала в античной науке. Мы

должны об этом знать хотя бы потому, что на это часто ссылаются как в последующих учениях нового времени, так и в литературе, искусстве.

Теперь обсудим вопрос о делимости и наличия предела делимости вещества. Идея о мельчайших частицах материи принадлежит Анаксагору. Он их называл гомемериями, семенами всех вещей. Они бесконечно делимы (не атомы). Но это такие частицы, которые обладают полным набором свойств большого тела, которые они образуют. Эта идея делимости здесь развивается и присутствует в таком виде.

Атомисты

Дальше надо вспомнить про атомистов. Начиная с 5 века и до нашей эры, они присутствуют в древней натурфилософии. Первые атомисты, Левкипп и Демокрит – личности более чем легендарные. К сожалению, их труды до нас не дошли, но нам повезло, что их сильно критиковал Аристотель. А труды Аристотеля, в силу ряда обстоятельств, до нас дошли в полном виде. Фактически, мы можем черпать информацию об атомистах (особенно, древних) из критики Аристотеля.

Это был именно философский атомизм. Если мы говорим об атомах в современной физике и об атомах в учении Демокрита, то мы говорим о совершенно разных вещах. Атомистам не нравилось, что их коллеги в других школах отрицали существования небытия. Им было важно, что существуют неделимые атомы и пустоты. Наличие пустоты – это и бытие, и небытие сразу. У атомов существует возможность соединяться, склеиваться. Возможно их движение, развитие. Таким образом, бытие и небытие между собой конкурируют.

Обсудим еще темы, которые всегда стоят рядом с атомизмом – регулярность и самопроизвольное случайное движение атомов. Здесь вспоминаются труды поздних атомистов (чьи труды до нас дошли), особенно Лукреция Карра, написавшего замечательную поэму «О природе вещей». Там также изложены атомистические взгляды.

Дошли до нас в частичном виде и труды Эпикура. В них прослеживается некоторое развитие атомистических идей. Кстати, зачастую люди гуманитарного склада ума сравнивают идеи регулярности и закономерности движения древнегреческих атомов с классической механикой. В частности, у Эпикура была идея самопроизвольно-случайного движения атомов.

Но к таким сравнениям надо относиться очень осторожно, потому что сами понятия «случайность» и «регулярность» у каждого философа принимали разные формы. В то время как в рамках современных представлений, случайность и

регулярность напрямую связаны с интегрируемыми задачами и с существованием интегралов движения. Более того, в современной механике уже давно нет места однозначному лапласовскому детерминизму. Имеется лишь динамический хаос и прочие случайности, благодаря которым сложность задачи описания движения резко возрастает, несмотря на развитость математического аппарата. А теперь вспомним, что в Древней Греции вообще никакой механики с матанализом не было. Философам приходилось обходиться только разговорами. Понятно, что результаты их рассуждений имели крайне малое отношения к современным представлениям. Но, тем не менее, очень важная идея атомизма все же присутствует.

Далее, обсудим моменты, которые встречаются в литературе по истории квантовой теории. К примеру, Гейзенберг считал, что квантовая теория (теория атома) устроена так, что это есть теория математическая. И идея о том, что атом представляет из себя все-таки математическую структуру, появляется еще у Платона (-429-347). Так что давайте обсудим *геометрический атомизм Платона*.

Платон

Платон, великий древнегреческий ученый-философ, имел прямое отношение к тому, чтобы философия стала учением, похожим на современное. Конечно, помимо прочего, он интересовался вещами, которые далеки от естествознания и физики. Но, тем не менее, у него присутствуют некоторые моменты, которые мы сегодня относим к естественнонаучной отрасли.

Надо иметь в виду следующее. Параллельно идеям об устройстве окружающего мира развивалась и математика. Но если теория чисел была довольно мистической, то геометрия стала упорядочиваться. Во времена Платона была доказана некая теорема, которая и сейчас многие из вас знают чуть ли не из школьной геометрии. Согласно ей, существует всего 5 правильных выпуклых многогранников. Возникла идея о том, что эти тела могут состоять из правильных треугольников. И эта идея единства выпуклых многогранников приводила к мысли о том, что их столько, сколько нужно. Стали появляться идеи не о четырех, а о пяти стихиях. Платон, в свою очередь, связал со стихиями определенные формы многогранников. Так как многогранники неделимы, то у Платона получался математический атомизм.

Евдокс Книдский

Также количественные соображения стали проникать в древнегреческую астрономию. Здесь существенна роль Евдокса Книдского (4 век до н.э.), ученика Платона. У него возникает идея объяснения движения планет, суть которой заключается в том, что планеты движутся по сложным, но закономерным траекториям

по небесной сфере. Для количественного подтверждения своих идей Евдокс предлагает систему гомоцентрических сфер. Эти системы в дальнейшем развиваются. Чаще всего это были движения по сферам или по окружностям. При этом основной идеей была концепция того, что в центре находится Земля. Сфера неподвижных звезд вращается вокруг Земли. Движение остальных планет при этом сложно, но все же объяснимо. Для объяснения как раз и использовали системы гомоцентрических сфер.

Аристотель. Перипатетическая школа

Далее, посвятим свое внимание великому мыслителю древности - Аристотелю (-384...-322), 4 век до нашей эры. Аристотеля и его учеников обычно называют последователями *перипатетической школы*. Роль Аристотеля при этом чрезвычайно важна и многогранна.

На Аристотеле завершается первый период, который мы вводили в нашей периодизации предыстории физики – формирование древнегреческой натурфилософии. При Аристотеле древнегреческая натурфилософия достигает своего пика. Следующий период имеет другое название, и мы успеем еще о нем поговорить

Надо сказать, что труды Аристотеля, в отличие от трудов обсуждаемых нами до этого философов, дошли до нас в довольно объемном виде. Вы даже можете пойти в книжный магазин и купить собрание его трудов.

Аристотель был гигантским авторитетом для других мыслителей. Поэтому период после его жизнедеятельности проходил под знаком влияния его учения. Соответственно, все остальные либо развивали дальше его позиции, либо, начиная с некоторого момента, от него отталкивались. К последним можно отнести и многих деятелей эпохи формирования современной физики. С этой точки зрения, надо знать, о чем говорил Аристотель (для того, чтобы понимать дальнейшее развитие физики).

Я выделил два направления, которые надо сформулировать в первую очередь. *Во-первых*, Аристотель довел до определенной степени совершенства представления о том, как должна быть устроена теория. Аристотель сформулировал критерии того знания, которое мы сегодня можем отнести к естественным наукам, и определил его структуру. *Во-вторых*, большое значение имеет конкретное изложение его трудов. Аристотель не просто хотел определить какие-то общие теоретические моменты, но наполнить эту теорию содержимым.

Далее пойдут куда более спорные вещи, поскольку это была ранняя стадия исследования мира. Возможности исследования были крайне ограничены, поэтому то, что относят к физике Аристотеля, вызывает очень много вопросов. Но, с другой

стороны, мы все равно должны хорошо знать и учитывать эти вопросы, поскольку они гигантским образом сказывались на дальнейшем развитии нашей науки.

Первым делом отметим идею о необходимости четкой логической конструкции. У Аристотеля, в отличие от предшественников, понятие логики доведено практически до современного представления. Законы логики были впервые четко сформулированы именно Аристотелем.

Далее, обсудим вопрос, касающийся того, как вообще устроена теория. Это важный момент, о котором часто многие не задумываются. Должен быть компактный набор первых принципов. Математики их называют аксиомами, физики – законами. Тем не менее, этот набор должен обладать определенными свойствами – внутренней непротиворечивости, полноты. Полностью формулировать эти требования мы сейчас не будем. Важно, что этот набор должен быть компактен в общечеловеческом смысле (то есть, их должно быть мало) и содержать в себе основные понятия и базовые законы. В дальнейшем из них, на основании логики, должны выводиться решения конкретных задач, конкретные свойства и теоремы, которые получаются в результате детального анализа.

Где мы видим воплощение этих идей? В геометрии Евклида. Возникнув спустя несколько десятилетий после Аристотеля, она была дальнейшим воплощением его системы идей.

Если говорить о физике, то в те времена сформулировать какую-нибудь последовательную теорию не удалось. То, что сделал Аристотель, может быть подвергнуто критике, как с нашей позиции, так и с позиции более ранней эпохи. Тем не менее, некая логическая четкость все же присутствовала, даже на довольно высоком уровне.

Приведем пример. У Аристотеля есть следующее положение: уединенное тело в пустоте будет или покоится, или сохранять свое равномерное прямолинейное движение. Скорее всего, вы удивитесь такому положению. Кажется, что такое утверждение может быть сформулировано Галилеем или Ньютоном, но на самом деле впервые оно появилось у Аристотеля. Правда, в данном примере оно вырвано из контекста. На самом деле, при помощи этого положения и логических рассуждений, Аристотель доказывал, что пустоты не существует. Согласно Аристотелю, тело должно не удерживать прямолинейное движение, а оно должно было бы находиться на своем месте. Но важнейшим положением физики Аристотеля, которую мы еще обсудим, было доказательство отсутствия пустоты. И именно на доказательство этого факта было направлено вышеизложенное положение. Как видим, здесь имеет место

исключительно последовательный логический подход, который производит сильное впечатление на читателей.

Далее, во всех книжках написано, что Аристотель систематизировал представление о причине. Но я бы не отнес это к числу главных достижений Аристотеля, так как здесь он, скорее всего, имел в виду проявление одушевления природы, которое современной физики не свойственно. Причинность есть в деятельности человека. Человек, который действует последовательно, обычно сначала высказывает определенную цель, а потом пытается с помощью логической цепочки рассуждений выстроить продвижение к этой цели. Причинность при этом возникает естественно.

Далее, Аристотелем был сформулирован сам термин «физика». И он опубликовал целый ряд трудов, среди которых «Физика», «О небе», «О метеорологии», «О рождении и разрушении», «Механические проблемы». В них он не просто пытался создать идею о том, как должна быть устроена наука об окружающем мире, но и попытался наполнить ее содержанием.

Обсудим теперь то, какую теорию выстроил конкретно Аристотель. В основном, его деятельность выражена в обобщении предшествующего развития натурфилософии. Но при недостаточно больших объемах информации обобщение не всегда бывает удачным. И здесь, с одной стороны, можно критически-иронически относиться к «физике» Аристотеля. С другой стороны, это надо знать, потому что в последующие эпохи от этой «физики» отталкивались очень многие деятели в Новое время. И чтобы понимать их труды, надо разобраться с первоисточником.

Ниже я попытался сформулировать некоторые основные положения картины мира Аристотеля.

1) Не существует пустоты.

Мы об этом уже говорили. Аристотель здесь решительно критикует атомистов, и из этой критики мы можем узнать одно из основных их положений. Аристотелю не нравилось, что атомы могут двигаться в пустоте. Он целым рядом способов пытался логически доказать, что такое невозможно. Один из способов я уже упоминал – рассуждение о том, что тело будет двигаться непонятно куда, а оно должно двигаться, по Аристотелю, к своему месту.

Есть и другие логические доводы. Например, при движении тела к своему месту, воздух сопротивляется ему, при этом «быстрота» движения обратно пропорциональна плотности среды. Если плотность среды положить равной нулю, то скорость передвижения будет стремиться к бесконечности.

2) Непрерывность вещества, в пустом пространстве движение немислимо.

Эти положения логично увидеть у Аристотеля, который, как мы уже поняли, был противником атомистов.

3) 4 противоположных начала, образующих 4 элемента. Тепло-холод, сухое-влажное. При этом, огонь – жаркий и сухой, воздух – жаркий и влажный, вода – холодная и влажная, земля – холодная и сухая.

Аристотель пытался систематично подойти к представлению о четырех стихиях, или четырех началах. (5 элемент – эфир). Аристотель говорил, что 4 основных начала являются комбинацией четырех противоположных начал – тепло-холод, сухое-влажное.

4) Начала и тела легки или тяжелы по природе.

Аристотель утверждал, что тела имеют какую-то позицию относительно некой абсолютной системы. Он считал, что в мире есть абсолютный центр – центр Земли. И все возможные расположения тел и движения происходят относительно центра Земли. Тела имеют положения, зависящие от их тяжести. Он считал, что самые тяжелые тела расположены ближе к центру Земли. То, что легче, расположено дальше. Соответственно, огонь легче воздуха, который легче воды, которая легче земли. За огнем расположена некая смесь эфира (пятого, идеального космического элемента) с земными 4 стихиями. Чем дальше, тем эфира больше.

Аристотель считал, что есть подлунный мир, где имеют место одни закономерности, и есть мир надлунный, мир космические и идеальный, в котором царствуют другие, идеальные законы. То, что мы наблюдаем возле себя - есть подлунный мир. Самое дальнее, что мы видим – это сфера неподвижных звезд. И они движутся по самому идеальному варианту движения – равномерное движение по кругу. Те тела, которые расположены ближе к Земле, движутся тоже вроде бы в рамках движения кругового, но все же движения испорченного – планеты, Луна.

5) Земля – истинно неподвижное шарообразное тело. Но кинематика «Физики» допускает относительность.

Дальше, Аристотель попытался создать (впервые в античности) систематическую механику, то есть получить какие-то законы движения тел. При этом стоит обратить внимание на то, что это был вариант именно механики, так как он пытался объяснить именно движение. Но Аристотель понимал, что есть еще описательное движение. И в описании он говорил об определенной относительности. Он понимал, что, с точки зрения различных наблюдателей, движение может возникать и исчезать.

- б) Из природной тяжести и легкости начал следует, что вода не может быть тяжелой по отношению к земле, а воздух – к воде. Следовательно, вода не может производить давления на землю, а воздух – на воду. *Horror vacui*.

У Аристотеля, как мы уже выяснили, есть иерархия тяжелых и легких тел. При этом очень важным было то, что тело, расположенное на своем месте, не оказывает никакого влияния на окружающие тела. Таким образом, известное ныне атмосферное давление было совершенно противоположно физике Аристотеля.

При этом у Аристотеля было важное понятие, связанное с этими вещами. Он понимал, что разрежение воздуха может возникать. В древние времена это явление активно использовалось. Например, можно откачивать воду из цилиндра через поднятие поршня. Аристотель прекрасно знал этот факт, но предлагал свое объяснение. Он говорил, что под поршнем будет возникать попытка к созданию пустоты (вакуума), которая вызывает «страх пустоты». Как следствие, внутреннее разрежение пытается поршень затянуть обратно. Таким образом, объяснение Аристотеля было прямо противоположное современному объяснению. Именно отсюда возник термин, который в новое время часто встречается в дискуссиях об атмосферном давлении – *Horror vacui*, «страх пустоты».

Механика Аристотеля. Закономерности движения тел по Аристотелю

В механике Аристотеля присутствует известное деление на типы движения:

- **Естественное** (движение снизу вверх и сверху вниз естественны для тел и продолжаются до насильственного прекращения)
- **Насильственное** (все остальные движения тел у Земли)
- **Движение небесных тел в надлунном мире** (движение тел, погруженных в эфир – оно идеальное и совершенное).

Движение небесных тел в надлунном мире есть движение идеальное, при котором тела погружены в эфир. Само движение осуществляется по кругу или по комбинациям круга. Движение остальных тел в подлунном мире – движение естественное и насильственное.

Естественное движение – это движение тела к своему месту. Например, движение тяжелого тела вниз, или легкого, наоборот, вверх.

Насильственное движение возникает, когда есть активный субъект, который воздействует на тело. Например, человек переставляет или бросает тяжелое тело. Такое движение имеет активную компоненту, или двигатель. Таким образом, если тяжелое

тело движется вверх, то на него обязательно должно оказываться насильственное воздействие.

Теперь обсудим следующий момент. Нередко говорят о механике Аристотеля в довольно осовремененном и примитивном смысле. Например, обсуждая механику Ньютона, берут второй закон Ньютона и формулу $F=ma$. Далее, пытаются в таком же духе сформулировать механику Аристотеля, выдавая формулу $F=mv$. И здесь надо иметь в виду, что Аристотель в своих трудах вообще не использовал формул.

Но это не значит, что он был противником математического описания. Наоборот, он позитивно относился к математическим соотношениям и структурам. Но каких-то однозначных выводов о законах движения из математики он не делал. И формул вроде $F=mv$, из которых можно было бы сделать вывод о пропорциональности скорости и силы, у него нет.

Поэтому деятельность Галилея, приведшая его к точному и последовательному описанию движения тела у поверхности Земли, оказалась очень важна. И, хотя само описание движения не противоречило Аристотелю, но идея о том, что скорость не зависит от массы тела, Аристотелю все же противоречит.

Конечно, какие-то количественные законы в то время были известны (законы рычага, геометрической оптики). И Аристотель даже пытался на эти темы как-то рассуждать, но ничего в явном виде до нас не дошло.

Обговорим достаточно неприятные намеки на внутренние противоречия в механике Аристотеля. Например, пусть тело было брошено, как мы сейчас бы сказали, под углом к горизонту. При этом, оно некоторое время будет лететь вверх, и лишь потом начнет падать вниз. Вопрос такой – почему оно летит вверх? Это не насильственное движение под действием руки человека, так как человек уже отпустил камень из рук. И как это состыковать с классификацией движения Аристотеля?

Аристотель пытался рассуждать, используя сложные движения воздуха. Он предлагал следующее объяснение. Воздух пытается компенсировать то разрежение, которое возникает за движущимся телом. Это противоречит страху пустоты, поэтому воздух с передних частей перетекает назад, и таким образом тело подталкивает. Вот такое удивительное объяснение предлагал Аристотель. Оно имеет греческое название «антиперестасис». С одной стороны, вроде бы приличное объяснение. Но, если мы его примем, то легко сможем докопаться до тех самых внутренних противоречий, которые сам Аристотель не допускал. Действительно, с одной стороны, у Аристотеля воздух обладает сопротивлением движущемуся телу. Чем плотнее воздух, тем медленнее

движется тело. А с другой стороны, в вышеописанном примере воздух наоборот, ускоряет тело и заставляет его двигаться вверх.

Обсуждение этих проблем и составляло критику последователей Аристотеля. Они должны были как-то сочетать логическую компоненту с тем, что в некоторых местах эта логика нарушалась.

Есть еще один существенный момент, в котором надо быть осторожным. Часто говорят, что в механике Аристотеля сила пропорциональна весу тела, умноженному на скорость. Здесь содержится сразу куча несуразностей. Отсутствие формул у Аристотеля мы уже обсудили, но есть и другие. Например, античности вообще не свойственно введение понятия скорости. Тогда не любили делить величины, имеющие разные размерность, в частности, не делили расстояние на время. Несомненно, о быстроте движения говорили, но только в виде пропорции.

Мы отметили гигантскую роль Аристотеля, в какой-то степени пророческую в создании новых теорий.

Александрийский период

Второй подэтап – Александрийский период – период эллинизма (-300... 2 век н.э.). Поясним смысл названия. Дело в том, что в этот период центр мира несколько преобразуется. Создается империя Александра Македонского, чьим учителем, кстати, был Аристотель, а затем разваливается. Но так получилось, что центр античной науки был перенесен в Александрию, «эллинистический Египет», по словам Птолемея. В это время уже формируется гигантская роль Рима, но центр науки по-прежнему находится в греческом мире, а наука пишется на греческом языке.

Также этот период называют периодом «математической физики». Такое название несколько противоречит тому, что мы раньше обсуждали (что физика возникла в 17 веке). Этот термин ввел Фердинанд Розенбергер. Он противоречит современной терминологии, но все же отражает какой-то элемент реалии того периода, в котором оформилась математика как система определенных теорий, причем вполне последовательных. Она ищет себе какие-то применения и находит их. Помимо этого, развиваются более четкие математические структуры.

Вспомним деятельность Евклида. Если до него в математике были несистематизированные представления, то у Евклида в начале 3 века до нашей эры возникает то, что мы называем сегодня «геометрией Евклида». В ней важно то, что она имеет ту структуру, о которой говорил Аристотель – компактный набор первых

принципов и определений. Точка, прямая, плоскость. И все дальнейшие задачи и теоремы решались логически с помощью базовых представлений, понятий и аксиом.

Здесь возникают попытки дальнейшего распространения и применения такой геометрии. Например, Евклид имел отношение к развитию геометрической оптики, которая тогда в каком-то виде существовала. В те времена не было закона преломления света, который появился в 17 веке. Но даже из законов прямолинейного движения и отражения можно много чего было получить.

Активно изучался закон рычага. Рассматривались, вводились и доказывались некоторые свойства и так далее.

Стоит упомянуть деятельность Архимеда, который тоже очень существенно продвинул древнюю математизированную науку. Вы знаете, что речь шла о выводах законах рычага, а также об измерении удельных весов тел с помощью известных методов погружения в жидкость. По сути дела, это было основание статики и гидростатики, где применялась новая математика.

Таким образом, мы видим достаточно много аргументов в пользу такого названия этого периода.

При расчетах удельных весов тел, можно заметить у Архимеда зачатки того, что потом называли «исчислением бесконечно малых». Это было существенное продвижение, которое, правда, не получило развитие. Также были и другие замечательные направления, но сейчас мы должны поговорить о других.

Клавдий Птолемей

Знания трудов Клавдия Птолемея нам пригодятся для дальнейшего понимания. Почему это важно? Потому что формирование новой физики в 17 веке связано с возникновением дилеммы, состоящей из противостояния системы мира Птолемея и Коперника. Как к этой дилемме пришли и в чем ее суть, мы обсудим немного позже. Но для начала поговорим о том, что создал Птолемей, и в чем заключается его система мира.

Птолемей (70-147 н.э.) был александрийским ученым, который писал труды на греческом языке. Его деятельность состоит из нескольких направлений. Самое знаменитое и главное – это замечательный труд, который в наше время называют «Общий обзор», или «Альмагест», что есть арабская транскрипция.

Дело в том, что труд Птолемея в греческом варианте был утерян. Он сначала попал на арабский Восток, где привлек внимание арабских ученых, которые перевели

его с греческого на арабский язык. И оттуда он стал распространяться в Европу, будучи написанным уже на арабском. А по-арабски, «Альмагест» и означает как раз «Общий обзор».

В «Альмагесте» есть, во-первых, звездный каталог. В те времена, конечно, не было иных оптических инструментов, кроме человеческого глаза. Но имелись некоторые приспособления, позволяющие фиксировать и измерять координаты звезд на небесной сфере. Птолемей, составляя звездный каталог, пользовался чужими исследованиями, дополняя их своими. В целом, на тот момент это был наиболее полный каталог.

Далее, основываясь в какой-то степени на идеях Аристотеля, он поместил Землю в центр мира. Но здесь стоит отметить интересный момент – Птолемей допустил смещение центра мира из центра Земли, чтобы точнее описывать движение планет (Солнце, Луна, Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн).

Как он объяснял их движение? Птолемей использовал сложное движение планеты по двум окружностям разного радиуса – по эпициклам и деферентам. Согласно модели Птолемея, всякая планеты равномерно движется по окружности (эпициклу), центр которой, в свою очередь, движется по окружности (деференту) вокруг Земли. Таким описанием ему удалось существенно повысить точность расчетов. Надо сказать, что деферентов и эпициклов у него было довольно много, и полученная комбинация оказалась довольно сложной.

Прежде чем идти дальше, зададимся вопросом – что такое система мира? Это система, которая позволяла рассчитать расположение всех планет в любой заданный момент времени. И этот алгоритм расчета и представляет собой систему мира. У Птолемея получилась довольно точная модель, хотя и совершенно безыдейная. И этот аспект крайне интересен как для последующего анализа его работ, так и для нашего курса в целом.

Вспомним, что иногда в качестве одного из аргументов необходимости перехода от системы Птолемея к системе мира Коперника приводят суждение, что система мира Коперника точнее. Так вот, это неправда. На самом деле система мира Птолемея была исключительной точной. Более того, она оказалась проверенной. А система, созданная Коперником, такой точностью не обладала. Ему самому трудно было это проверить, так как ошибка накапливается какое-то время. Но спустя несколько веков расхождения стали заметны.

Конечно, были и другие попытки приложения тогдашней, более продвинутой математики. В частности, Птолемей, вместе с другими своими коллегами, пытался исследовать геометрическую оптику, применяя экспериментальный метод.

Обратим внимание на то, что утверждение «древняя физика противостояла экспериментальным исследованиям, состояла только из общих абстрактных рассуждений о законах мира в целом и была далека от реальных количественных экспериментов» совершенно неверно. На самом деле, такие эксперименты были просто затруднены. Когда мы говорим о количественном эксперименте, нужно себе представлять, что мы измеряем, какими способами можем это сделать, и так далее. Когда мы имеем минимум информации, то все это проделать уже не так-то просто.

Хороший пример – оптика Птолемея. Он приводит попытку создать закон преломления света. Оказывается, что это была не просто абстрактная попытка создать абстрактный закон, но это было еще и описание эксперимента. У Птолемея был способ измерения углов, он рассматривал лучи падающие и преломляющие. Измерял углы падения и получал углы преломления. Он хотел доказать, что угол падения пропорционален углу преломления. Сейчас, конечно, сказали бы, что это справедливо лишь при малых углах, а в общем случае это не так. Но точность измерений той эпохи не позволяло найти такие ошибки, и Птолемей этим и ограничился. Да, закон преломления в том смысле, который нам известен, у него не получился. Тем не менее, описания экспериментальных исследований были. И мы не можем почувствовать здесь никакого отторжения по отношению к постановке конкретных экспериментов и экспериментальному определению закономерностей.

Что же, пойдем по хронологическому порядку дальше. Но ситуация такова, что чем дальше, тем более контурно мы рассматриваем материал. К такому подходу имеется ряд объективных причин. Ведь со 2 и до конца 6 века имеет место определенный упадок интереса к науке, что можно связать с разными факторами, в том числе, с появлением новых религиозных течений.

В конце концов, где-то в 7 веке Александрийский центр был уничтожен. Александрийская библиотека была сожжена в результате арабского завоевания. К тому же, в средние века людей намного больше интересовали религиозные вопросы, чем вопросы количественно-математического устройства окружающего мира. Поэтому об истории физики в Европе известно немного. Но всем интересующимся могу посоветовать почитать Фердинанда Розенберга.

Что касается сохранения античных трудов, то очень характерен пример с Птолемеем. Действительно, очень значительная часть трудов в Европе была уничтожена или пропала. Но арабы, завоевав всю южную и юго-восточную часть

тогдашней Ойкумены, эти труды в значительной степени сохранили, переведя их на арабский язык. И арабская наука для нас ценна в том числе и тем, что ей удалось сохранить многие античные труды.

Стоит отметить, что в эту эпоху, с одной стороны, уменьшается интерес к естественным закономерностям. С другой стороны, повышается догматическое восприятие Аристотеля. Его вклад в создание представления о том, как должна быть устроена наука, меркнет. А конкретные положения его учения об окружающем мире, наоборот, превращаются в догмы. И, когда интерес к естественнонаучным вещам восстанавливается, то в центре всех учений оказывается представление Аристотеля.

Консенсус всех представителей истории физики сходится на том, что перелом в развитии физики происходит в конце 16 – начале 17 века и связан с деятельностью одного человека – Галилео Галилея. При нем возникает экспериментальное естествознание. И здесь важно иметь в виду, что у Галилея нет теоретического объяснения тому, что он делает. Но в ретроспективе мы видим, что это и есть тот момент, в который началось возникновение физики в современном смысле.

Лекция 3. Научная революция 16-17 века. Возникновение экспериментального естествознания

План лекции:

Галилей (1564-1642). Создание новой механики.

Конкретная деятельность:

- Астрономические исследования с использованием «телескопа».
- Наука о *местном движении*

Особенности деятельности:

- Противостояние схоластике
- Реальное воплощение нового метода (а не рассуждения о нем).
- Соединение формулировки общих принципов новой механики, количественных экспериментов и математики.

Исследования движения тел у поверхности Земли (под воздействием тяготения):

- Мысленные эксперименты (в том числе, падение тел).
- Движение шаров по наклонному желобу.

Принципы новой механики:

- Математически точное описание
- Законы равноускоренного движения, $x \sim t^2$
- Идеи мгновенной скорости и «вектор» - направленный отрезок
- Принцип разложения движений
- Принцип инерции как предел
- Принцип относительности
- Принцип Торричелли, $v \sim \sqrt{h}$

Эванджелиста Торричелли (1608-1647):

- Движение тел под углом к горизонту (парабола).
- Движение тел по поверхности (в том числе, маятник).

Рене Декарт:

- Концепция новой науки – метафизика Декарта.
- Сплошная среда – континуум.
- Корпускулы, близкое действие, вихри.
- Формулировка *принципа инерции*.
- Взаимодействие тел, законы соударения тел. Сохранение количества движения.

Задача о соударении тел – конкурс Лондонского королевского общества, 1668:

- Уоллес (математик) – абсолютно неупругий удар.
- Ренн (архитектор) и физик Гюйгенс – абсолютно упругий удар.

Гюйгенс (1629-1695). Продвижение доньютоновой механики (1673, Horologium Oscillatorium):

- Математический маятник – изохронность и циклоидальный маятник.
- Физический маятник – приведенная длина.
- Центостремительное ускорение при движении по окружности.

Механика континуума (аэростатика и гидростатика):

- Возрождение статики и гидростатики (Архимеда) в 17 веке.
- Ограниченность страха пустоты – Галилей, Торричелли.
- Опыт Торричелли. Торричеллиева пустота, идея атмосферного давления.
- Зависимость высоты столба от погоды и высоты над уровнем моря. Торричелли-Паскаль-Галлей, 1680 – барометрическая формула.
- Эффективный воздушный насос. Опыты Отто фон Герике, 1657 (бургомистр Магдебурга).

Галилей (1564-1642). Создание новой механики

Система мира Птолемея показала очень высокую точность. За 13 веков (с 200 по 1500 годы) накопленная ошибка оказалась небольшой. Точность получилась очень высокая, даже при всех идейных дефектах. А Коперник точность своей системы промерить не мог. Чтобы хоть какую-то точность соблюсти, ему пришлось тоже ввести деференты и эпициклы. Таким образом, даже при создании гелиоцентрической системы все равно нужно было учитывать неравномерность. Теперь мы прекрасно понимаем, что речь идет о законах Кеплера (в первом приближении).

Для того, чтобы проверить качество систем, приходилось долго наблюдать. Измерить накапливающуюся ошибку в те времена было не так просто. И через 50-70 лет после кончины Коперника стало ясно, что точность в его системе не очень хорошая. Поэтому утверждать, что Коперник придумал более точную систему, нельзя.

С другой стороны, вектор развития был крайне важен. Это был вектор идейного упрощения. Заметим, что не глобального упрощения, а именно идейного. Ведь в математическом отношении, система мира Коперника была сложнее системы Птолемея. А суть упрощения состояла в компактном наборе первых принципов, в идейной, логической простоте с достаточно четким логическим выводом. Направление развития новой науки и обеспечила идеологический успех.

Кстати, систему мира Коперника никто сначала не запрещал. На нее даже особо не обратили внимания. Ситуация стала серьезной только в начале 17 века. И здесь отцом-основателем новой физики, безусловно, является Галилео Галилей (1564-1642). Мы сейчас обсудим его конкретную деятельность.

Конкретная деятельность

Но надо иметь в виду следующее. Конечно, Галилей был вдохновлен мыслью Коперника. И даже не самими расчетами, а скорее постановкой вопроса. Кроме того, на самом деле тяжесть, которую мы ощущаем на поверхности Земли, связанная с притяжением к центру Земли, должна присутствовать на других планетах. То есть, эта схема уравнивала Землю в правах с другими планетами. Обратим внимание, что ни о каком всемирном тяготении речь пока не идет. Есть лишь определенное покушение на ряд идей Аристотеля. Потому что помещение Земли на периферию солнечной системы явным образом противоречит базовым положениям физики Аристотеля.

Говоря о конкретной деятельности Галилея, необходимо обратить внимание на следующее. Она, кратко говоря, распадается на две части – на *астрономические исследования с использованием «телескопа»* и на *науку о местном движении*.

Почему я поставил «телескоп» в кавычки? Использование оптического прибора было, несомненно, переломным моментом в астрономических исследованиях той эпохи. Но этот прибор, скорее был, усовершенствованной подзорной трубой. Галилей не был изобретателем этого устройства. Трубы использовались в то время в мореплавании. Они были введены в оборот без какого-то научного обоснования. А Галилей лишь усовершенствовал ее. По сути, у него получилась подзорная труба с увеличением в 30 крат. Поэтому это трудно было назвать телескопом. Но дальше развитие пошло намного быстрее, и существенным было именно это развитие «экспериментальной техники».

Пример. Ко второй половине 17 века у ученых имелась возможность использовать реальные телескопы. Причем как рефракторы, так и рефлекторы. Таким образом, использование Галилеем телескопа не было «началом» новой физики в истинном смысле этого слова. Потому что тут Галилей совершил скорее качественное открытие. А «новая наука» - это математически нагруженная наука.

Таким образом, в первом пункте речь идет именно о качественных открытиях. Большинство из них вы знаете. Они выстраиваются в систему определенных аргументов, подтверждающих систему Коперника. Известно, что Галилей открыл пятна на Солнце, вращение Солнца. Открыл горы на Луне, фазы Венеры, неточность планет и целый ряд других вещей, которые подтверждали идею о том, что эти планеты похожи на Землю и нет смысла Землю помещать в центр мира.

Стоит отдельно упомянуть одно замечательное открытие, которое сыграло очень существенную роль в дальнейшем развитии механики небесных тел. Речь идет о «медицинских лунах». Дело в том, что с помощью трубы Галилея можно наблюдать 4

больших спутника Юпитера и их движение вокруг центрального тела. Галилей исследовал это движение, в основном, качественно. Тем не менее, он имел как бы модель Солнечной системы, на которую можно было наблюдать со стороны.

Мы не будем подробно обсуждать биографические подробности жизни Галилея. Но, как вы знаете, в тридцатых годах 17 века у Галилея начались серьезные неприятности с инквизицией, с католической иерархией. И роль Галилеевских спутников была следующей. Дело в том, что с какого-то момента было запрещено в явном виде пользоваться системой мира Коперника. И те, кто не хотел лезть против запретов того времени (нарушение которых могло привести к серьезным последствиям), прикрывались объяснением движением Медицийских лун.

Но это все были качественные моменты, которые трудно назвать «новой наукой». Поэтому мы переходим ко второму пункту. Это и было создание «новой науки», или, по словам Галилея, «о местном движении». В то времена механику еще делили на две части (это происходило вплоть до Ньютона) – движение небесных тел и движение тел у поверхности Земли. И первую часть – о небесных телах – Галилей не очень-то и рассматривал. Кстати, возможно, он и не знал о достижениях Иоганна Кеплера, который создал совершенно другую кинематику движения планет в Солнечной системе.

Чем же Галилей внес в «местное движение»? Самое интересное, что при создании науки о местном движении, он рассматривал движение тел у поверхности Земли под воздействием тяготения. Это был первый реальный этап создания новой физики и существенной части экспериментального естествознания. Здесь надо сказать, что сам Галилей практически не говорил о методе новой науки. По сути дела, это не философские труды – это реальное создание решения задач, реальное применение нового метода.

Особенности деятельности

С точки зрения нашего времени, можно отметить следующие особенности метода Галилея:

- Противостояние схоластике.
- Реальное воплощение нового метода (а не рассуждения о нем).
- Соединение формулировки общих принципов новой механики, количественных экспериментов и математики.

Во-первых, Галилей формулировал какие-то общие принципы. Можно заметить, что этот метод был не таким индуктивным, каким его часто потом изображали. Многие

принципы Галилей был вынужден формулировать еще до экспериментальных исследований. Мы это еще обсудим подробней.

Также существенными были сами количественные эксперименты и математика. Конечно, в тот период математика от физики отставала. И Галилею, а потом и Ньютону, приходится создавать новые разделы в математике, которые получают сначала физический уровень строгости, и лишь потом эта математическая система доводится до оптимального статуса и все логические связи выявляются.

Также надо сказать следующее. Если спросить на экзамене, какие конкретно были исследования у Галилея, то в ответе часто приходится слышать рассуждения в духе «в учебнике нарисована Пизанская башня, и оттуда что-то швыряется». Надо понимать, что такие эксперименты могли быть только мысленными.

Если вы собираетесь просто рассматривать движение тел, брошенных с высоты, и исследовать законы движения, то Вам нужен очень точный метод измерения времени и фиксации начала, окончания движения. Даже в нашем практикуме, где используются электронные секундомеры, не удастся достичь высокой точности регистрации времени падения тел. Что уж говорить о методах того времени. Если учесть еще и сопротивление воздуха, то результаты таких экспериментов ценности и вовсе представлять не будут.

Тогда как мог Галилей измерять время? Никаких механических часов тогда не было, они как раз были одним из первых достижений новой науки. Конечно, есть довольно точные солнечные часы, но они непригодны для измерения малых интервалов времени. Водяные, песочные часы тоже не могли измерять совсем малые интервалы, к тому же в них есть некая неравномерность, и, как следует, не очень высокая точность. Можно было измерять промежутки времени с помощью пульса (чем Галилей и пользовался). Но пульс сам по себе весьма неустойчив. Таким образом, все эти методы были неточные. И падение тел – не тот эксперимент, который хочется услышать как ответ на такой вопрос.

На самом деле, Галилей использовал качение шаров по наклонной плоскости. Такая задача интересна с идеологической точки зрения. Дело в том, что Галилей, фактически, решал неправильную задачу. Вы прекрасно знаете, что, если шар катится по желобу, то трение, конечно, будет маленькое, но при этом ускорение будет отнюдь не $g \sin \alpha$. Вращательное движение тоже вносит свой вклад, и, если шар движется без проскальзывания, то на результаты эксперимента будет оказывать влияние момент инерции шара. Соответственно, результат будет не совсем таким, какой нужно.

Принципы новой механики

Галилей использовал новые принципы, в которых можно найти противоречие. Для начала перечислим их:

- Математически точное описание
- Законы равноускоренного движения, $x \sim t^2$
- Идеи мгновенной скорости и «вектор» - направленный отрезок
- Принцип разложения движений
- Принцип инерции как предел
- Принцип относительности
- Принцип Торричелли, $v \sim \sqrt{h}$

Рассмотрим 4 пункт – принцип разложения движений. По сути дела, Галилей предложил идею о том, что падение можно разложить на составляющие. При наличии наклонной плоскости шар будет двигаться замедленно за счет того, что движение происходит одновременно в горизонтальной и вертикальной плоскости. Но вы понимаете, что, тогда, при стремлении угла α к нулю, все движение должно было становиться горизонтальным, что, вроде бы, наблюдается. Но, при стремлении угла к 90 градусам, ускорение шарика не будет совпадать с g (за счет именно качения, а не скольжения).

Следующий аспект деятельности Галилея, который нужно проследить. Он пытался сделать математически точное описание. Но это была эпоха, когда никакого математического анализа не было. Если сказать современному школьнику, что движение является равноускоренным, то он ответит, что скорость пропорциональна времени, а пройденный путь пропорционален квадрату времени. Все эти результаты достаточно легко выводятся. Но только лишь при использовании математического анализа (или его упрощенных вариантов). У Галилея ничего этого не было. И факт пропорциональной зависимости между пройденным путем и квадратом времени Галилей получил с большим трудом. Сначала он думал, что скорость пропорциональна пройденному пути, и лишь потом пришел к другому выводу.

Другой пример. Современникам Галилея была совершенно непонятна такая вещь, как мгновенная скорость. В те времена, в отличие от античных, понятие скорости уже вводилось. Делили расстояние на время (напомню, что во времена Аристотеля было не принято делить величины, имеющие разную размерность). Сейчас мы рисуем график движения, $x(t)$, и мгновенная скорость есть тангенс угла наклона касательной к точке графика. До этого дела дойти было достаточно тяжело, трудно было ввести понятие скорости для конкретного момента времени. Здесь мы можем наблюдать предвидение некоторых аспектов, которые сейчас относим к математическому анализу.

Кстати, работы Галилея очень полезно просто почитать. У него есть две основных замечательных работы – совсем популярный «Диалог о двух главнейших системах мира», Птолемеевой и Коперника и «Беседы и математические доказательства, касающихся двух новых наук». Если в первой работы были в основном философские дискуссии, то во второй было уже намного больше математики. Необычно, что оба этих труда были изданы на итальянском языке (хотя языком науки была латынь). Тем не менее, для популяризации своих идей, Галилей публикует их на итальянском. Любопытно, что на русский язык эти труды были переведены только в 1947 году.

В любом случае, советуя почитать эти труды. Вы увидите, что там сформулирована та система взглядов, которая сейчас преподается школьникам. Например, определение вектора как направленного отрезка, введено именно там, хоть и конкретно слово «вектор» в работах Галилея не встречается. Графики движения, траектории, касательные – все это появляется у Галилея.

Обсудим другие принципы новой механики. С некоторыми из них мы не вполне можем согласиться (четвертый – уже обсудили). Пятым пунктом идет принцип инерции. Обратим внимание на то, что явной формулировки этого принципа у Галилея нет. Если при рассмотрении движения по наклонной плоскости уменьшать угол наклона, ускорение стремится к нулю и шар, который катится по горизонтальной поверхности, будет катиться с постоянной скоростью. Это совершенно противоречит идеям «насилованного движения» Аристотеля. Это именно что движение по инерции. Но обратим внимание, что явной формулировки этого нет. Впервые формулировку этого принципа даст Декарт.

Принцип относительности – тоже очень важный принцип, у которого тоже нет явной формулировки в трудах Галилея. Можете посмотреть формулировку этого принципа в учебниках Спасского или Кудрявцева. Конечно, ничего похожего на встречающиеся в учебниках формулы преобразования координат у Галилея нет. У него есть качественное обсуждение наблюдений в адмиральской каюте большого корабля. Окна в адмиральской каюте большие, их можно зашторить. И при отсутствии качки наблюдаются все те же явления, что и на берегу – движение маятника, падение тел, и так далее. Галилей утверждал, что тогда невозможно определить, движется этот корабль равномерно прямолинейно, или покоится. Вот такое качественное описание присутствует в этих книгах.

Есть еще один принцип, который потом стал называться принципом Торричелли. У Галилея его зачатки, безусловно, есть, поэтому его можно считать одним из авторов. Торричелли, будучи учеником Галилея, более аккуратно использовал те же идеи. Фактически, это предтеча закона сохранения механической энергии. О чем идет речь? О том, что скорость пропорциональна корню квадратному из высоты. И, если мы будем

менять угол наклонной плоскости, то эта зависимость останется неизменной. И, используя эту идею, можно, построив любую кривую, получить закон движения. Но это сделали уже существенно позже.

Отметим еще один вопрос. В чем заключалось принципиальное отличие той науки, которая описывала механическое движение от той, которая наследовала положения натурфилософии Аристотеля? Прежде всего, отличие заключалось в уже упомянутом принципе инерции. А также в том факте, что ускорение получается одинаковым, вне зависимости от массы тела. Как следствие, и время падения тоже получается одинаковым.

Эванджелиста Торричелли

Эванджелиста Торричелли (1608-1647), ученик Галилея, внес весьма существенные дополнения в результаты, полученные Галилеем. У него имеются более детальные исследования того, что будет с телом, брошенным под углом к горизонту. Но эти исследования были скорее не экспериментальные, а математические. Кстати, это были первые «заказные» исследования, так как было крайне важно знать траекторию полета артиллерийского снаряда. Конечно, точность была невысокая за счет того, что сопротивление воздуха не учитывалось. Поэтому прикладная часть исследований была неудачной, но это не помешало Торричелли все равно проводить их.

У Галилея были утверждения (еще в тридцатые годы 17 века) о том, что есть замечательное свойство колебаний маятника. Он наблюдал колебания различных подвешенных предметов, в том числе и того, что мы сегодня называем математическим маятником. Он обратил внимание на изохронность колебаний маятника, то есть период колебаний не зависит от начальных условий. На самом деле, обоснование этой изохронности и того факта, что период пропорционален корню квадратному из длины маятника, принадлежит Торричелли. Он воспользовался принципом, который позже стал носить его имя, и вывел формулу для периода колебаний маятника.

Рене Декарт

Другой центральной фигурой первой половины 17 века является Рене Декарт (1596-1650). К нему мы будем часто возвращаться, потому что не только Декарт, но и некоторые его положения его учений, сыграли очень существенную роль в дальнейшем развитии физики.

Последователей Декарта называют *картезианцами*. В чем заключаются идеи, которым они следовали – вопрос достаточно интересный. Давайте скажем несколько слов о Декарте. Сначала набросаем общий план:

- Концепция новой науки – метафизика Декарта
- Сплошная среда – континуум
- Корпускулы, близкодействие, вихри
- Формулировка *принципа инерции*
- Взаимодействие тел – законы соударения тел, сохранение количества движения.

Декарт был уникальной личностью, который сочетал в себе и философскую деятельность (прежде всего), и математическую (декартова система координат, методы аналитической геометрии), и физическую. Тут можно вспомнить открытие закона преломления света, закон Декарта-Снеллиуса. Снеллиус был голландским физиком, который, скорее всего, сформулировал этот закон независимо от Декарта. Кстати, именно в тридцатые-сороковые годы 17 века оформилась геометрическая оптика, как замкнутая наука.

Когда говорят об основных положениях физики, нужно иметь в виду следующее. В то время была тенденция к оценке метода новой науки со стороны. Напомню, метод был индуктивный, основанный на количественном эксперименте, а дальше на индуктивном обобщении результатов и формулировке законов природы. У Декарта же была особая позиция в этом отношении. И она была во многом нестандартна для основного направления того времени.

Часто говорят о метафизике Декарта. Декарт очень существенное значение отдавал тем принципам, которые формулируются еще до эксперимента. Они не следуют из него, даже, может быть, их и невозможно вывести эксперимента. Речь идет о некоторых положениях, представлениях, которые ученый должен сформулировать до эксперимента и использовать в формулировании конкретных механических моделей, объясняющих явления.

Второй момент – идея сплошной среды. Обратите внимание на то, что развитие наших представлений и знаний часто бывает волнообразным. Если в Средние века натурфилософия Аристотеля была канонизирована и стала основным сбором положений, касающихся устройства природы, то новая наука 17 века, отталкиваясь от Аристотеля и его положений, объявляла их устаревшими, схоластическими. Но при этом Декарт почему-то возвращался к Аристотелю.

Вспомним, что одной из основных идей Аристотеля была идея отсутствия пустоты, и он критиковал атомистов за это. И Декарт, вслед за Аристотелем, утверждал, что пустоты не существует, что весь мир чем-то заполнен. При этом такое положение утверждается на новом уровне.

И здесь надо быть аккуратным. Мы видим, что в 17 веке рождаются различные разделы физики. Про оптику мы уже сказали, но, помимо нее, появляется механика сплошной среды. И механика сплошной среды – это наука, которая как-то стыкуется с механикой точки, механикой абсолютно твердого тела. Но, тем не менее, это совершенно самостоятельный раздел. Отцом-основателем этой науки заслуженно считают Рене Декарта. Он ввел не только математическое понятие континуума (позже появились множества различной мощности), но и понятие непрерывной, сплошной среды.

Главная задача заключалась в исследовании движения этой сплошной среды. Дальше возникает какая-то структура этого движения. В частности, возникают знаменитые вихри Декарта. Они использовались последователями Декарта при объяснении различных взаимодействий. А на вопрос – «вихри чего?», как раз и был ответ – вихри сплошной среды. Иногда ее называли эфиром, иногда по-другому.

Но в любом случае, структура этой среды была у Декарта достаточно сложной. С одной стороны, Декарт не был атомистом, у него все было чем-то заполнено. С другой стороны, она имела какую-то структуру. Он вводил то, что мы называем корпускулами Декарта. Корпускулы чем-то похожи на атомы. Сам Декарт рассматривал их как посредников взаимодействия, он сам поставил задачу об ударах. Но все же корпускулы – не атомы, потому что они могут склеиваться, могут менять свою структуру – то, что совершенно не свойственно концепции неделимого атома, атома без внутреннего устройства.

Еще одна идея, которая в дальнейшем развивалась и воплощалась в физике – это идея близкодействия. Противостояние близкодействия и дальнодействия как раз рождается в 17 веке, и Декарт был отцом концепции близкодействия. Близкодействие нужно объяснять через взаимодействие тел, помещенных в одну точку – это именно локальное взаимодействие. Тела и корпускулы взаимодействуют только при непосредственном контакте. А если речь идет о другом виде взаимодействия, то всегда надо искать посредника.

Когда возник вопрос об объяснении движения небесных тел, планет, то последователи Декарта, в какой-то момент признав гравитацию, тяготение, пытались объяснить гравитацию через какое-то движение невидимых флюидов, тех самых вихрей. Они считали, что ньютоновское гравитационное взаимодействие – это лишь

внешнее, наблюдаемое явление. За этим стоит некий механизм взаимодействия, включающий в себя невесомые флюиды, которые определенным способом воздействуют на тела, вызывая наблюдаемое притяжение.

Принцип инерции мы уже обсуждали, детально останавливаться на нем не будем. Декарт, несмотря на своеобразные взгляды, безусловно, воспринял учение Галилея. Главный позитив, который он там увидел – это точечное математическое моделирование движения, расчеты движения.

По сути дела, только после Декарта механика становится той наукой, которую мы сейчас имеем. Действительно, даже в школьной программе написано, что механика – это наука о взаимодействии тел. То есть, должно быть, по крайней мере, два взаимодействующих тела. Но слово «взаимодействие» появляется только после Декарта. У Галилея взаимодействия нет, есть только некое внешнее воздействие, вызывающее отклонение от движения по инерции. Конкретно *взаимодействие* ввел именно Декарт.

Наиболее ярким приложением идеи взаимодействия была идея о законе соударения этих самых корпускул, небольшого размера тел, которые сталкиваются. Довольно широко известно, что при попытке создания закона соударения тел, у Декарта, с одной стороны, был позитивный момент, который получил в дальнейшем развитие – идея о том, что есть некая мера движения, и этой мерой движение является импульс, количество движения. Но идея импульса была введена не очень удачно. Эта величина у него была скалярной, не обладала направлением. Поэтому получилось довольно противоречивое объяснение движения. Даже его современники не очень восприняли его идеи о законе соударений.

Незадолго до 1668 года возникает очень важная научная организация – Лондонское королевское общество. Один из первых конкурсов, объявленных организацией, был конкурс на решение задачи соударения тел. Потому что законы, предложенные Декартом, признавались не очень удачными и внутренне противоречивыми.

Были представлены три работы – математика Уоллеса, описавшего абсолютно неупругий удар, и архитектора Ренна и физика Гюйгенса, которые описали абсолютно упругий удар. В работе Уоллеса закон сохранения количества движения получался, как мы сегодня сказали бы, в векторном виде, там учитывался знак. Ренн и Гюйгенс попытались объяснить абсолютно упругий удар, при котором не происходит внутренних изменений тел.

Надо иметь в виду, что задачу о касательном ударе была совершенно невозможно решить без полной механики Ньютона. Речь шла только о лобовом столкновении. Продвинуться дальше в доньютоновскую эпоху удалось только при учете симметрий.

Самой интересной работой была работа Гюйгенса. Правда, в полном объеме эту работу опубликовали только после его смерти. Тем не менее, основные положения были известны. И даже сам Ньютон писал, что третий закон механики, который он ввел в связи с взаимодействием тел, в значительной степени возник как реакция на работы Гюйгенса по абсолютным упругим ударам.

О каких симметриях идет речь? Понятно, что если рассмотреть два одинаковых тела, испытывающих лобовое упругое столкновения, то они с такими же скоростями и разлетятся. А если массы разные, то приходится использовать, как мы сегодня говорим, законы сохранения. Во-первых, это закон сохранения импульса (как при неупругом ударе), а во-вторых, принцип Торричелли. Гюйгенс, детально к тому времени исследовав маятники, рассмотрел столкновения двух рядом расположенных маятников и обнаружил, что высоты, на которые грузы поднимутся после столкновения, связаны определенным образом.

Христиан Гюйгенс

Как уже было упомянуто, центральной фигурой в доньютоновской эпохе был Христиан Гюйгенс (1629 – 1695). Что про него нужно сказать? Первым делом, Гюйгенс продолжал искать математические решения тех задач, которые поставил Галилей. С помощью более детальных математических методов, с помощью применением принципа Торричелли, Гюйгенс смог решить целый ряд важнейших задач. В основном, это задачи, связанные с маятником.

Во-первых, Гюйгенс решил задачу математического маятника и получил знаменитую формулу (носящую теперь его имя) для периода такого маятника. Во-вторых, он рассмотрел колебания подвешенного твердого тела – то, что мы сейчас называем физическим маятником.

Далее, Гюйгенс выяснил, что маятник совершает, вообще говоря, не совсем изохронные колебания. Зависимость периода от начального положения маятника все же возникает, но лишь при больших амплитудах. Но все же существует определенная траектория движения груза (например, циклоида), при движении по которой колебания все же будут строго изохронными.

Кроме того, Гюйгенс отличился тем, что он не только провел математические и экспериментальные исследования, но и одним из первых смог свои результаты

воплотить в виде каких-то механических устройств. По сути дела, Гюйгенс был изобретателем маятниковых механических часов, причем часов самых разных видов.

Далее, в 1773 году вышел замечательный труд Гюйгенса, «Маятниковые часы», в котором написано далеко не только про само это изобретение. В дополнениях к этой книге был получен еще один важный результат, связанный с движением по окружности. Если внимательно читать того же Галилея, то несложно прийти к выводу, что движение по окружности является движением равноускоренным (так как у Галилея скорость – направленный отрезок). Направление скорости при движении по окружности равномерно изменяется, значит, и можно рассчитать ускорение, которое мы называем центростремительным. Так вот, решение именно этой задачи и получил Гюйгенс, выведя формулу $a_{цс} = \frac{v^2}{R}$, где v – скорость тела при движении по окружности. Почему этот результат был особенно важен по той причине, что стоял очень близко к уже устоявшимся в обществе законам Кеплера.

Возникновение теории гравитационного взаимодействия

Мы не будем обсуждать всю физику 17 века, потому что к некоторым вопросам будем еще возвращаться (электричество, оптика, тепловые явления). Но гравитацию стоит обсудить именно сейчас, потому что именно этот вопрос был второй предтечей работ Исаака Ньютона. Обратите внимание на то, что уже в 17 веке были очень важны результаты, полученные в работах Иоганна Кеплера (1570-1630). Эти результаты получены в связи с исследованиями, которые были посвящены астрономическим системам мира.

Как известно, в какой-то момент Кеплер отказался от геоцентрической системы. Его шеф, Тихо Браге, был сторонником усовершенствованной системы Птолемея. А Кеплер сделал гениальное открытие, укладывающееся по времени в рамки 1609-1619 годов. Ему удалось показать следующее. Если предположить, что Солнце находится в центре мира, а вокруг него по известным эллиптическим орбитам движутся все известные планеты, то точность предсказаний положения небесных тел существенно повышается.

Таким образом, Кеплером были сформулированы знаменитые три закона. Планеты двигались по траекториям, близким к окружностям (эксцентриситет был очень небольшой). Но для того, чтобы заметить, что в фокусе эллипса находится именно Солнце, надо брать радиус-вектор от Солнца до планеты, получать для него какие-то закономерности – это очень непросто. Одно дело, если речь шла бы о движении комет, по сильно вытянутым траекториям, и сопоставить эти траектории с формой эллиптической, параболической или гиперболической было бы проще. Но

тогда данных по кометам было мало. Распространить законы Кеплера на кометы удалось намного позже. Но, тем не менее, замечательная идея замены эпициклов и деферентов на эллипсы с тремя законами позволила чрезвычайно повысить точность. Кстати, именно тогда выяснилось, что точность схемы Коперника недостаточно высокая.

Далее, перечислим основные тезисы, характерные для теории гравитационного взаимодействия того времени:

- Идея тяжести как притяжение к центру Земли Галилея.
- Множественность центров притяжения Коперника-Галилея.
- Вихри Декарта (Декарт – Гук – Лейбниц).
- Всеобщность дальнодействующих сил тяготения, Роберваль, 1644 г.
- Медицинские луны Борелли, 1665 г. Динамическое равновесие в поле тяготения.

Откуда берутся эллипсы, Кеплеру было совершенно непонятно. Но интересно также то, что у него встречается идея всеобщего тяготения. Кеплер считал, что тяготение распространяется в плоскости эклиптики, и представляет собой влияние полумистического вида, убывая по закону r^{-1} . Но многими такое объяснение символизировало возврат к средневековой схоластике, к наделению тел скрытыми свойствами, «душой», от чего пытались избавиться Галилей и Декарт.

Как уже было сказано, на ученых произвела впечатление точность системы, предложенной Кеплером. Она была просто поразительной. Поэтому к сороковым-шестидесятым годам 17 века от системы Кеплера уже трудно было отказаться. И здесь возникают различные идеи, стремящиеся дополнить идею основную.

Во-первых, появилось объяснение всеобщности дальнодействующих сил тяготения на примере системы галилеевых спутников. В сороковые годы уже было опасно публиковать подтверждение системы мира Коперника, поэтому итальянские ученые, в частности, Борелли, в 1655 году, использовал законы Кеплера для объяснения движения именно 4 спутников Юпитера и выдвинул идею о динамическом равновесии в поле тяготения. Но эта работа не была хорошо просчитана в математическом плане. Там не решалась до конца обратная задача Кеплера – по заданным траекториям вывести притяжение r^{-2} (впервые это сделал Ньютон). Что уж говорить о прямой задаче – по закону притяжения r^{-2} вывести форму траекторий.

Упомянем еще вихри Декарта и вопросы, которыми в основном занимались его последователи - Гук из Британского Королевского общества в Англии и Лейбниц в Германии. Эти люди, следуя за идеями Декарта, говорили о неравномерном вращении

тел (об изменении угловых скоростей планет), что похоже на движение вихря. А поскольку надо дать механизм, объясняющий наблюдаемые явления, то идея всеобщего тяготения казалась неподходящей, так как был непонятен механизм такого тяготения. Непонятно, как через пустое пространство распространяется взаимодействие.

Взамен, в качестве такого механизма предлагались вихри. Разные части вихря как раз вращаются с разными угловыми скоростями. И в дальнейшем, именно с такой позицией будет спорить Ньютон. Но даже после Ньютона картезианцы не унимались. И в 18 веке, признав успех Ньютона в описании движения, они говорили о необходимости объяснения природы гравитации, ведь, по их мнению, без локального механизма (вроде вихрей) ничего хорошего не получится.

Механика континуума (аэростатика и гидростатика)

Обсудим еще одно важнейшее открытия в области, примыкающей к механике – в механике континуума. Речь идет об открытии атмосферного давления. Кстати, когда в школе изучают опыт Торричелли, то не очень понимают фундаментальность этого открытия. На самом деле, как мы помним, в античные времена утвердилась позиция Аристотеля по этому вопросу. Он считал, что есть определенная степень тяжести у земли, воды, огня, воздуха. Но эти сферы друг на друга не давят в принципе. К тому же, из положения, постулирующего отсутствие пустоты, следует «страх пустоты».

В древности знали о существовании «вакуумного» насоса, в котором можно с помощью разрежения поднять воду на определенный уровень. Вспомним, как это объяснял Аристотель. В той области, где пытаются наметиться разрежение, возникает внутреннее стремление системы компенсировать это разрежение, и поэтому мы не можем вытянуть цилиндр из поршня, поэтому вода следует туда, где воздух разрежен. В наше время объяснения прямо противоположное – мы должны преодолевать именно силу внешнего давления воздуха, а не внутреннего стремления.

Эта дискуссия могла продолжаться долго (ведь не так-то просто определить, где внутреннее воздействие, а где внешнее). Но как раз во времена активной деятельности Галилея начали когда активно создаваться фонтаны. Инженеры пытались с помощью насосов, которые создавали разрежение, поднимать воду вверх. И оказалось, что более чем на 10 метров поднять воду таким образом невозможно. Галилей, а затем и Торричелли обратили на это внимание и подтвердили этот факт.

При этом Торричелли обнаружил, что если взять более плотную, чем вода, жидкость (например, ртуть), то высота, на которую удастся поднять ее, составит всего 75 сантиметров. Торричелли показал, что в трубке, запаянной с одного конца, ртуть

поднимается до определенной высоты. И там, выше столбика ртути, образуется некая +область, которую сам Торричелли счет примером пустоты. Сейчас мы, конечно, понимаем, что там образуются пары ртути. И только за счет того, что парциальное давление паров ртути намного меньше атмосферного при комнатной температуре, мы можем пренебречь давлением этих паров.

Далее, нашелся аргумент в пользу того, что возникающее давление является давлением именно внешним. Во-первых, если бы высота столба была связана с внутренним фактором, «страхом пустоты», то она должна быть одинакова. А оказалось, что эта высота зависит от погоды. И как это объяснить с точки зрения Аристотеля – непонятно. Во-вторых, Паскаль, как известно, забрался на гору и показал, что там давление меньше. Кстати, в 1680 году Галлей уже получил правильную барометрическую формулу с экспонентой.

Точку в доказательстве существования атмосферного давления поставили исследования Роберта Бойля. С помощью изобретенного в то время насоса он смог создать существенное разрежение в специальной камере и провести целый ряд экспериментов, результаты которых окончательно доказали существование атмосферного давления.

Лекция 4. Механика Ньютона. Развитие механики после Ньютона

План лекции:

Исаак Ньютон (1643-1727).

Краткая биография:

- Прошел все степени Кембриджского университета за 7 лет – 1660-1667
- В 1669 г. Возглавил Лукасовскую кафедру математики. Читал лекции по оптике 1 час в неделю.
- Борьба с католиками; концентрация политических, богословских и научных действий.
- 1688 г. – «Славная революция», Вильгельм Оранский. Ньютон – член парламента.
- 1696 г. – (сначала смотритель) директор монетного двора, денежная реформа в Англии.
- С 1703 года – президент Лондонского Королевского общества.
- 1705 г – рыцарское звание.
- Умер в 1727 году от мочекаменной болезни.

Предварительные физико-математические труды:

- Еще до Ньютона де-факто формируется понятие функции, возникает аналитическая геометрия Декарта.
- Математические труды 1665-1666 года. В рамках решения оптических задач, в связи с построением касательных к кривым был открыт метод флюксий (производных, качественно-количественное понятие кривизны). Формальное обоснование – в конце 19 века.
- Оптика 1666-1675 годов. Ньютон искал адекватную математическую модель. Его адепты в дальнейшем предельно упростили и выхолостили идеи Ньютона. «Приступы легкого отражения». Но целостная парадигма в оптика сформируется позже.

«Математические начала натуральной философии»:

- Ключевое слово – «математические».
- Ньютон не мог ограничиться качественной или эмпирической концепциями тяготения.
- Ньютон не был принципиальным противником идей Декарта, но...
- 3 прижизненных издания – 1686, 1713, 1725 - на латинском языке. В 1727 году Мотт издал их на английском языке.
- Роль Эдмунда Галлея (первоначальные планы и идеи были в 1667 – 1669 годах).

- Лейбниц в 1689 году опубликовал противоположную концепцию движения планет. В ней притяжение стыковалась с картезианской идеей увлечения тел по орбите вихрем.
- Ньютон ссылается на предшественников – Галилей, Декарт, Гюйгенс, Рен, Уоллис.
- Пикар довольно точно измерил радиус Земли.

Содержание «Математических начал натуральной философии».

Введение:

- Определения:
 1. Количество материи (масса) есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее. Атомизм Ньютона.
 2. Количество движения (скорость \times масса тела).
 3. Врожденная сила материи – сила инерции.
 4. Приложенная сила – есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения (обычная сила).
 5. Центростремительная сила – та, с которой притягиваются тела к некоторой точке, как к центру. Такова сила тяжести на Земле и сила, действующая на планеты. Здесь идея тождественности силы тяжести, действующей на камень и силы, обуславливающей движение Луны.
 6. Ускорительная величина силы – напряженность поля. Ньютон не пользуется понятием ускорения, у него это лишь «скорость, производимая в заданное время».
 7. Движущая величина силы (dp/dt – похоже на обычную силу).

NB Фактически, речь идет только о центральных силах, но явно это не сформулировано.
- Поучение: абсолютное-относительное пространство и время.
- Аксиомы или законы движения:
 1. *«Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние»*
 2. *«Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует».*
 3. *Действию всегда есть равное и противоположное противодействие. Иначе – взаимодействия двух тел друг на друга равны и направлены в противоположные стороны».*
- Следствия:
 1. Принцип параллелограмма сил.

2. Закон сохранения импульса системы.
3. Роль центра масс – аналогия с отдельным телом.
4. Относительные движения тел одинаковы. «Покоится ли пространство, их заключающее, или движется равномерно и прямолинейно».

Первый том – О ДВИЖЕНИИ ТЕЛ. Движение тел в пустоте под действием «центростремительной силы». 14 разделов:

1. О методе первых и последних отношений. Геометрический вариант математического анализа.
2. Нахождение центров сил по движениям (прообраз сохранения момента).
3. Обратная задача механики. Аналог теоремы «живых сил».
- 4-6. Способы определения параметров эллиптических и гиперболических траекторий и законов движения по астрономическим данным.
7. Решение уравнения движения для произвольного закона сил методом сведения к неявным квадратурам (термин «квадратура кривых»), представленным геометрически. Дан геометрический метод решения одномерного уравнения $\ddot{x} = f(x)$.
8. Двумерное движение в поле различных сил.
10. Движение по заданным поверхностям (случай одного тела). Центральная сила и маятники.
11. *Задача двух тел*, которая сведена к задаче одного тела. Синтез полного решения *задачи Кеплера*.
12. «Задача о притягательных силах сферических тел». Основы теории гравитационного взаимодействия больших тел с непрерывным распределением масса.
14. Задача о движении малых частиц под действием центральных сил вблизи поверхности большого тела – вывод закона преломления и отражения в рамках корпускулярной концепции света. Обоснование – ссылка на конечность скорости света (Олаф Ремер).

Второй том – ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ. Учет силы сопротивления в среде по эмпирическим формулам. 9 разделов:

1. Сила сопротивления $F \sim v$. Убывание скорости в геометрической прогрессии.
- 2-3. $F = -k_1 v - k_2 v^2$. Геометрический метод интегрирования.
4. Движение по спирали в поле центральных сил и в вязкой среде.
5. Гидростатика и равновесие в поле центростремительных сил. Обобщение барометрической формулы.
6. Затухающие колебания маятников.
8. Гармонические волны в средах, где действует закон Бойля. Скорость звука
9. Вихри в жидкостях – спор с Декартом и его последователями.

Третий том – СИСТЕМА МИРА И ПРАВИЛА РАССУЖДЕНИЯ В ФИЗИКЕ. Система мира на основе новой физики, в том числе:

- Движение планет, Луны, комет и спутников Юпитера, Сатурна и законы Кеплера;
- «неправильности» лунных движений и теория возмущений;
- Связь движения тел у поверхности Земли с движением Луны. Подтверждение единой природы этих движений на основании измерений радиуса Земли Пикаром. Всемирное тяготение.
- Методология физической теории. «... Не должно принимать в природе иных причин сверх тех, которые истинны и достаточно для объяснения явлений.... Ибо природа проста и не роскошествует излишними причинами». Знаменитое «*гипотез не измышляю*».

Развитие механики в 18-19 веках.

Развитие аналитических методов механики:

- Дифференциальные уравнения в механике точки (Эйлер, 1736).
- Динамика твердого тела (Эйлер, 1765)
- Системы со связями (Д'Аламбер, Бернулли). Вариационные методы.
- «Аналитическая механика» Лагранжа, 1788.
- Открытие Урана Гершелем в 1781 году и Нептуна Леверье и Адамсом в 1846 году.
- 19 век – Гамильтон...

Лапласов детерминизм и индетерминизм Пуанкаре:

- Попытка обосновать теорию возмущений в небесной механике и поставить вопрос об устойчивости движения планет.
- Атомизм + единственность решения задачи Коши.
- Пуанкаре доказал, что задача трех тел принципиально не интегрируема.

Относительность в механике:

- Появление инерциальных систем отсчета, Людвиг Ланге, 1886.

Исаак Ньютон (1643-1727)

Сегодня мы продолжим разговор о развитии первого основного раздела физики, возникшего в 17 веке – о классической механике.

Мы обратили внимание на то, что отцом-основателем такой механики был Галилей. Но то, что позже стали называть «парадигмой классической механики», сформировалось позднее. Набор всех тех основных положений, которые позволяли решать широкий круг задач. И роль Исаака Ньютона, о котором мы сегодня будем

говорить, заключалась в окончательном формировании парадигмы. Но здесь есть целый ряд нюансов, к которым я хотел привлечь особое внимание.

Краткая биография

Надо сказать, что Ньютон пришел в физику в ту эпоху, когда формировалось знаменитое Лондонское Королевское общество – центр британской науки. И на раннем этапе своей жизни Ньютон принял участие в деятельности этого общества.

Мы сейчас не будем детально останавливаться на биографии Ньютона, хоть она довольно интересна. Призываю всех полюбопытствовать и ознакомиться с литературой. Но некоторые моменты все же осветим.

В 1669 году Ньютон приступил к своей деятельности в Кембриджском университете. Но даже еще раньше у него были опубликованы работы по математике и по оптике.

В 1668 году, через год после публикации знаменитых «Математических начал натуральной философии», в Англии происходит т.н. «Славная революция», которая довольно сильно изменила жизнь Ньютона. Он стал заниматься политикой, был какое-то время членом парламента. И уже в конце 17 века его деятельность была связана Монетным двором.

Вообще, о Ньюtone можно говорить долго. Направлений его деятельности было также очень много. Но мы сосредоточимся только на одном. Мы поступим довольно своеобразно – даже не будем рассматривать последовательно деятельность Ньютона, а просто рассмотрим содержание «Математических начал натуральной философии». Кстати, эта замечательная книга вполне доступна в замечательном переводе академика Крылова.

Здесь возникает ряд интересных моментов, которые связаны с тем, что некоторые позиции в области физики освещаются довольно плохо и представляются нам в искаженном виде.

Обратите внимание, что в первую часть своей жизни, будучи уже человеком в науке, Ньютон изобрел то, что мы сейчас называем «дифференциальным и интегральным исчислением». Если говорить об истории математики, то основы нынешнего математического анализа заложены именно в 17 веке. Подход к функциям, к переменным, к гладким зависимостям, интегрирование, дифференцирование – весь этот аппарат был изобретен в 17 веке в результате деятельности Исаака Ньютона и Готфрида Лейбница – немецкого философа и математика.

Эти труды Ньютон в полном объеме не публиковал. О них было известно из его разговоров с его коллегами, из некоторых его сообщений на научных собраниях того времени. Только в самом начале 18 века, примерно через 40 лет, у Ньютона возникла дискуссия с Лейбницем относительно приоритета открытий в этой области.

Мы уделяем внимание этому вопросу потому, что дальнейшее развитие механики Ньютона без «исчисления бесконечно малого» попросту невозможно.

Второй момент. Известно, что Ньютон на раннем этапе своей деятельности был последователем некоторых идей Декарта. В частности, ему нравилась идея локального взаимодействия, толчка. Потом, когда идея всемирного тяготения и дальнедействующих сил проникла и стала необходимым моментом его концепции, Ньютон все равно рассматривал их как дополнение к некоторым идеям взаимодействия Декарта.

По поводу трудов по оптике скажем лишь пару слов. Мы к ним вернемся, когда будем говорить об истории развития оптики. Интересно, что труды были выполнены до публикации «Математических начал натуральной философии», в шестидесятых – начале семидесятых годов.

В это время проявляются очень сложные взаимоотношения Ньютона с Робертом Гуком. Гук был членом Лондонского Королевского общества и замечательным физиком. У него были замечательные экспериментальные результаты, но в области теории (особенно, математической), у него не было таких эффектных результатов, как у Ньютона. Но, тем не менее, у Ньютона и Гука возникли не очень простые отношения. Часто возникают вопросы, как о приоритете, так и об относительном вкладе Ньютона и Гука в формирование основ классической механики. Эта дискуссия касается также и области оптики, из-за чего Ньютон решил не публиковать свои труды до кончины Гука. Самое интересное, что он-таки смог дождаться этого момента и в начале 18 века свои труды все же опубликовал. Но к этим вопросам мы еще вернемся.

«Математические начала натуральной философии»

Здесь существует масса штампов, которые хочется побороть. Давайте попытаемся их сформулировать.

Мы уже обсуждали «предыстории» развития классической механики в 17 веке. Мы видели, что многие идеи, лежащие в основе объяснения движения небесных тел, формировались до Ньютона. И, когда говорят, что Ньютон объяснил движение планет, сформулировал и решил задачу механики, надо четко понимать, в чем конкретно заключается заслуга Ньютона. Если вы этого не сделаете, то получаться только общие

разговоры и неправильное понимание развития механики. Именно это мне и хочется подправить.

Обсудим сначала некоторые общие моменты. В «Математических началах натуральной философии» ключевым словом является слово «*математические*». Сам этот труд был опубликован в 1686(7) году. Известно, что Ньютон уговорил своего друга и коллегу, Эдмунда Галлея, на скорейшую публикацию «Математических начал натуральной философии». Эдмунд Галлей был английским астрономом, математиком и физиком.

Интересно, что Галлей обсуждал решение задачи движения небесных тел с помощью методов новой механики. Гук утверждал, что он смог решить эту задачу, вывести законы Кеплера из взаимодействия r^{-2} . И, когда говорят, что Ньютон впервые предложил закон всемирного тяготения и взаимодействие планет с Солнцем как r^{-2} , надо иметь в виду, что это получилось достаточно прозрачно и явно.

Как вы помните, в 1673 году Гюйгенс опубликовал выражение для центростремительного ускорения. Оттуда, в сочетании с третьим законом Кеплера, стало понятно, что взаимодействие должно описываться законом r^{-2} . Но, как выяснилось, Гук не смог решить прямую задачу механики – вывести законы Кеплера из взаимодействия по закону обратных квадратов. Когда Галлей увидел, что у Ньютона эту задачу решить получилось, он вдохновился этим фактом и помог Ньютону опубликовать работу быстрее.

Еще раз хочу подчеркнуть, почему слово «математический» является ключевым. Люди придают очень большое значение каким-то общим словам, особенно в наше время. А у Ньютона определяющим моментом был именно математический метод.

При этом Ньютон преследовал еще одну значимую цель. Ему нужно было не только математически решить задачу. Он одновременно спорил с противоположной концепцией, которая в то время была весьма популярна. Речь идет о картезианской концепции, под которой подразумевалось следующее. Для ее сторонников самым главным было объяснение природы. Они допускали взаимодействие по закону r^{-2} , но также требовали и объяснение этого воздействия через некие силы, которые, по Декарту, могли быть только локальными. Декарт и его последователи предлагали механизм для такого тяготения в виде вихревого движения эфира в окрестностях Солнца. И Ньютон пытался опровергнуть эту точку зрения.

Роль математики важна еще и потому, что конкуренты Ньютона не могли создать теорию такого же математического уровня.

Кстати, современный вдумчивый читатель увидит, что конструктивная часть в «Математических началах натуральной философии» весьма сильная и удивительная. При этом критика не столь убедительна. Можно сделать вывод о том, что попытки Лейбница, Гука, Гюйгенса и других создать локально-полевою теорию того же эфира не могли иметь такой же математический уровень в ту эпоху. Потому что теория сплошной среды, гидродинамика и полевая концепция требовали другого математического аппарата, который в то время даже не был намечен.

Но у Ньютона был важен следующий момент. Еще до него говорили о всемирном тяготении. Ньютон, безусловно, был сторонником этой точки зрения. Вы знаете легенду о яблоке, которое в саду упало на него. И здесь неважно, было яблоко или нет. Ньютон все равно считал, что тела у поверхности Земли движутся под действием той же самой силы, что и Луна вокруг Земли. Но Ньютону требовалось экспериментальное подтверждение этой гипотезы, а для этого надо было иметь точное значение радиуса Земли. Интересно, что как раз в семидесятые годы французский исследователь Пикар смог получить это значение весьма точно. А к радиусу Земли было привязано расстояние до Луны. Таким образом, можно было количественно проверить, работает ли идея Ньютона.

Содержание «Математических начал натуральной философии»

Часто возникают вопросы относительно того, какие задачи решил Ньютон. Неподготовленный человек начинает говорить, что Ньютон создал классическую механику, придумал 3 закона Ньютона и решил все, что можно было только решить. На самом деле это не совсем так. Хотя бы потому, что в таком случае после Ньютона никаких задач в классической механике не осталось бы. Поэтому то, о чем говорят большинство – лишь введение. На самом деле, «Математические начала натуральной философии» - весьма объемный труд, который состоит из вводной части, введения, и трех томов. Содержание введение больше популяризуется и там действительно есть вышеупомянутые вещи. И я хотел бы выделить некоторые моменты.

Введение

Во-первых, у Ньютона появилось классическое определение количества материи, *«количество материи (масса) – есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее»*. Смысл этого определения не всем понятен. И вообще, надо сказать, что трактат Ньютона сделан в духе античных времен, когда создавались труды Евклида. Именно тогда возникла идея о компактном наборе основных базовых понятий и аксиом. И с современной точки зрения определение количества материи выглядит довольно бессмысленно. На самом деле, эти вопросы уже давно обдуманы. Считается,

что Ньютон, как и многие его коллеги той эпохи, был сторонником атомизма. И под плотностью тогда подразумевалась именно плотность упаковки атомов и молекул.

Далее, Ньютон ввел *количество движения* как скорость, умноженную на массу тела. Из изложения понятно, что Ньютон считает скорость вектором (вслед за Галилеем), как и силу.

А вот по поводу силы возникают терминологические проблемы. Обратите внимание, что многие термины устанавливались довольно долго. Тогда не было однозначного определения термина «сила». Слово «сила» было довольно многозначным. Например, термин «энергия» возник лишь в 19 веке. Но уже во времена Ньютона использовали похожие образы (например, принцип Торричелли). Но то, что мы называем кинетической энергией, в то время называлось «живой силой». А потенциальную энергию называли «мертвой силой».

У Ньютона сила использовалась вместе с различными прилагательными. *Врожденная сила материи*, что отождествлялось с силой инерции. *Приложенная сила* есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. *Центростремительная сила* – та, с которой тела притягиваются к некоторой точке, как к центру. сила тяжести на Земле и сила, действующая на планеты. Подчеркнем, что Ньютон в своей работе дополняет идеи важности центральных сил. В современном изложении, в третьем законе Ньютона говорится, что силы – центральные. У Ньютона этого в чистом виде нет. Например, у него нет в чистом виде законов сохранения (особенно закона сохранения момента количества движения). Но он говорит, что для центральных сил будет так-то и так-то, а *могут быть и еще силы. Во всяком случае, понятие о важности и единственности сил* возникла намного позже. Тем не менее, центростремительные силы для Ньютона очень важны, а мы должны их понимать как центральные силы. Далее, *ускорительная величина силы, движущая величина силы* – все эти определения для нас любопытны и важны для понимания.

Дальше идут знаменитые законы движения. Интересно посмотреть, как они формулировались.

Аксиомы или законы движения

Закон 1.

«Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние»

Закон 2.

«Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует»

Закон 3.

«Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе – взаимодействия двух тел друг на друга равны и направлены в противоположные стороны».

Например, во 2 законе Ньютона упоминается в явном виде направление силы и ее величины. Понятие вектора тогда не было, но косвенно здесь оно присутствует.

Интересно, что Ньютон нигде не вводит понятия ускорения.

На 3 закон я уже обратил внимание. Здесь не освещается отдельно центральность сил.

В 1 законе есть нюанс. В нынешней формулировке к 1 закону привязывают понятие инерциальной системы отсчета. Но никаких ИСО в 17 веке не было. В поучении Ньютона упоминается, что очень сложно определить абсолютное движение. Но он считал, что, безусловно, имеет место возможность точного определения абсолютного движения относительно абсолютной системы отсчета (как мы бы сейчас сказали). Этот факт он связывал в значительной степени с богословскими идеями. При этом он видел, что из его конструкции, из его механики, напрямую абсолютное движение вывести практически невозможно. Есть лишь элементы абсолютности. Но все он верил в абсолютную систему отсчета. Вывести абсолютное движение очень важно, но пока мы не можем этого сделать. Кстати, инерциальные системы отсчета появились только в 1886 году. Идея была сформулирована в Германии Людвигом Ланге. Таким образом, ИСО – результат дальнейшего развития механики.

Далее, обсудим следствия, вытекающие из сформулированных выше законов.

2. **Принцип параллелограмма сил.** Имеется в виду метод сложения векторов сил. Кроме того, сейчас это следствие считают одной из аксиом. Неявно это принцип суперпозиции.
3. **Закон сохранения импульса.**
4. **Роль центра масс.** Аналогия системы с отдельным телом с массой, сосредоточенной в точке центра масс.
5. **Относительность движения тел.** Аналог принципа относительности.

Дальше обсудим содержание трех томов, следующих за введением.

Первый том – О ДВИЖЕНИИ ТЕЛ

Именно в этом томе содержится суть работы. В томе содержится множество отделов и разделов.

Первый отдел – о *методе первых и последних отношений* – геометрический вариант «математического анализа». Здесь Ньютон предлагает методы, аналогичные методам математического анализа. Обратите внимание, что в дальнейших работах, уже достигнув успеха в «исчислении бесконечно малого», Ньютон многие построения проводил аналитически. А в «Началах» используется геометрический метод доказательства.

Перечислим кратко другие отделы и разделы:

Второй отдел – *нахождение центров сил по движениям* (прообраз сохранения момента)

Третий отдел – обратная задача механики, аналог теоремы «живых сил»

4-6 разделы – рассмотрены способы определения параметров эллиптических и гиперболических траекторий и законов движения по астрономическим данным.

Седьмой раздел – дано решение уравнения движения для произвольного закона сил методом сведения к неявным квадратурам (термин *квадратура кривых*), представленным геометрически. Фактически дан геометрический метод решения одномерного уравнения $\ddot{x} = f(x)$.

Восьмой раздел – рассмотрено двумерное движение в поле различных сил

Десятый раздел – движение по заданным поверхностям (случай одного тела) + центральная сила и маятники

Одиннадцатый раздел – рассмотрена *задача двух тел*, она сведена к задаче одного тела. Получение полного решения *задачи Кеплера*.

Не пускаясь в подробные описания вышеизложенных разделов, я хочу отметить вот что. Плохо образованный человек не понимает, что перед Ньютоном стояла задача с очень сложной математической компонентой – нужно было решить прямую задачу Кеплера. Вы знаете, что решается она не так уж и просто – не даром в курсе общей физики ее не преподают, оставляя курсу теоретической механики. И основная заслуга Ньютона в том, что ему удалось эту задачу решить. Его конкуренты этого сделать не смогли.

Ньютон обобщил выводы Кеплера на остальные тела Солнечной системы, в частности, на кометы, которые в то время активно изучались. Помимо эллиптического движения, он рассмотрел гиперболические и параболические траектории. Ньютон рассмотрел вопрос о связи параметрах эллипса, гиперболы и параболы с астрономическими данными.

Далее, обсудим уравнение $\ddot{x} = f(x)$. Думаю, что даже многие подготовленные физики и математики не смогут решить это уравнение в лоб. Вы знаете, что в решении задачи Кеплера важную роль играют моменты. Затем надо связать двумерное движение с одномерным. В итоге приходим к вышенаписанному уравнению. Чтобы его решить, надо помножить правую и левую часть на \dot{x} , воспользоваться законом сохранения энергии и получить ответ в неявном виде – в виде зависимости времени от координат, а не координат от времени. Именно это и содержится в седьмом разделе. Заметьте, что решение в аналитическом виде получено только через 80 лет. Ньютон все сделал геометрически, что намного сложнее. Вместо интегрирования он вычислял квадратуры – площади под кривыми.

Конечно, работа была тяжела в плане изложения. Мало кто понимал труд Ньютона. Современный подготовленный человек, конечно, поймет, но лишь приложив определенные усилия.

Далее, в первом томе показано, как можно свести двумерную задачу к одномерной (не только для взаимодействия по r^{-2} , но и для любой другой степени). Забегая вперед, отметим, что Ньютону все же повезло, что степень у радиуса равна именно -2. Потому что только для такого значения получаются замкнутые кривые.

Полученную одномерную задачу можно решить геометрическим способом. Если зависимость силы от радиуса выражается законом r^{-2} , то в ходе решения получаются эллипсы, гиперболы и параболы. Если какая-то другая степень, то решение останется в квадратурах.

В 10 разделе Ньютон рассматривает маятники как приложение своей теории. Любопытно заметить, что в маятниках возникают другие силы (например, сила реакции связи).

В 11 разделе содержится синтез полного решения задачи Кеплера. Обратите внимание на еще один важный результат, принадлежащий именно Ньютону. Он показал, что решил не задачу в поле действия силы r^{-2} , а решил задачу двух тел. Еще Декарт завещал, что надо рассматривать задачи на взаимодействие тел, и Ньютону первому удалось это показать.

Закон всемирного тяготения

Но на этом труды Ньютона не заканчиваются. Нельзя недооценивать еще один момент. Про всемирное тяготение вам рассказывали еще в школе, а затем и в университете. Вводили зависимость силы от радиуса и рассматривали различные тела. На вступительных экзаменах вполне допускается вопрос о гравитационном взаимодействии, например, двух чемоданов. Понятно, что абитуриент такую задачу не решит, но он может высказать идею о том, что надо разбить чемоданы на мелкие частицы, размеры которых много меньше расстояния между ними, а потом просуммировать по первому и второму чемодану. Ясно, что получится очень сложный результат (по сути дела, шестикратный интеграл).

Конечно, в наше время так никто не делает. Говорят о важности шарообразной формы, потому что планеты и звезды имеют форму именно шара. Далее, известный факт, что два сферически симметрично заполненных материей шара, обязательно должны взаимодействовать как 2 точки. Но современному школьнику, студенту этот результат выводят через теорему Гаусса. Ньютон, конечно, не мог пользоваться этой теоремой, так как Гаусс жил в первой половине 19 века. Поэтому стоит оценить сложность задачи для той эпохи, особенно, если учесть состояние математического аппарата того времени. И тот факт, что Ньютону удалось решить эту задачу (она, кстати, излагается в 12 разделе, «Задача о притягательных силах сферических тел»), достойна особого уважения.

Еще один момент. Ньютон рассматривал вопрос о том, что будет внутри шара. Допустим, мы выкопали канал на поверхности шара. Вы знаете, что сила (в случае однородного шара) будет пропорциональна r . Постановка задачи была достаточно известной и вызывала странные реакции. Дело в том, что если речь идет о взаимодействии небесных тел, то совершенно невозможно проверить этот результат. Никто не мог прорыть тоннель к центру Земли. И такие задачи часто вызывали отторжение у обобщенного обывателя. Кстати, эти настроения нашли свое отражение в замечательном романе Джонатана Свифта «Путешествия Гулливера», где можно встретить интересную аллюзию на Лондонское Королевское общество.

И лишь спустя 100 лет с помощью метода, предложенного Ньютоном, Кавендиш смог экспериментально доказать зависимость r^{-2} для силы Кулона. И теоремы, доказанные Ньютоном, здесь напрямую использовались. Но это произошло позже. А во времена Ньютона никто не мог предположить, что для доказательства такого взаимодействия не надо копать тоннель к центру Земли.

Дальше 14 раздел. Возможно, с точки зрения математики результат здесь получается достаточно простой. Но это отражает связь с оптикой. Речь вот о чем. Если

у нас есть плоский слой сил (сейчас бы мы назвали их потенциальными) и частица, пролетающая через этот плоский слой, то она будет либо отскакивать от этого слоя, либо испытывать что-то вроде преломления – в зависимости от сил, которые могут либо полностью погасить нормальную составляющую скорости, либо нет. Мы видим, что здесь Ньютон говорит о возможном движении оптических частиц. А также из текста следует, что, в целом, Ньютон не называл свою книгу «Математические начала механики». Речь шла о математических началах физики в целом. Здесь присутствует представление о том, что методы и основы, предложенные во «Введении», пригодны для решения любой задачи физики.

Такая всеобщность законов физики весьма характерна. Мы надеемся, что сможем создать единую теорию всего. Ньютон тоже так считал. Но до сих пор так и не получилось, но надежда есть.

В 14 разделе также имелись представления о конечности скорости света. Но мы к оптике еще вернемся и поговорим об этом подробнее.

Как мы убедились, первый том «Математических начал натуральной философии» является ключевым. В нем решена задача Кеплера, причем решена с учетом тонких аспектов, связанных с формой взаимодействующих тел.

Второй том – ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ

Учет силы сопротивления в среде по эмпирическим формулам. Запишем основные разделы и тезисно опишем их суть.

- Раздел 1. Сила сопротивления $F \sim v$. Тогда скорость убывает в геометрической прогрессии.
- Раздел 2-3. $F = -k_1 v - k_2 v^2$. Геометрический метод интегрирования.
- Раздел 4. Движение по спирали в поле центральных сил и в вязкой среде.
- Раздел 5. Гидростатика и равновесие жидкости в поле центростремительных сил. В случае закона Бойля – обобщение барометрической формулы, выведенной Галеем.
 - Попытка вывести закон Бойля из статической атомистической схемы
 - Наметки гидродинамики. В основном, чтобы утверждать, что небесные тела ни с какой средой не взаимодействуют.
- Раздел 6. Затухающие колебания маятников.
- Раздел 8. Гармонические волны в средах, где действует закон Бойля.

Скорость звука, $c = \sqrt{\frac{p_0}{\rho_0}}$

- Раздел 9. Вихри в жидкостях. Спор с Декартом и его последователями.
Законы Кеплера не удовлетворяют части вихря.

Второй том отличается от первого. Здесь больше уделено внимание критике Ньютона. На самом деле его смысл заключался в попытке продемонстрировать, что конкуренты Ньютона – картезианцы в лице Лейбница, Гюйгенса, Гука – таких же успехов не добились. Их идея вихрей, объясняющих тяготение, по мнению Ньютона была несостоятельной. Но для демонстрации этого он рассматривал взаимодействие тела со средой.

С одной стороны, целый ряд результатов второго тома для нас важен, вы должны их знать. С другой стороны, в то время было довольно сложно доказать сформулированные тезисы. Если вы рассматриваете континуум, эфир и вихри в нем, то надо написать математическую теорию для этого континуума. Конечно, у Декарта была в свое время сделана заявка на такую теорию. Для гидростатики из нее что-то получилось. А в динамике удалось добиться каких-то результатов, в лучшем случае, в 18 веке (многие вопросы остаются неизученными и до сих пор). Тем не менее, Ньютон эти вопросы рассматривает.

Во-первых, у Ньютона возникает важная идея о том, что сила может зависеть не только от координат, но и от скоростей. Возникают диссипативные силы. При этом теряется смысл механики, как науки, описывающих взаимодействие тел – как и у Галилея, описывается лишь одно тело, движущееся под действием среды.

И даже такую простую задачу в ту эпоху, когда математический анализ только создавался, было не так легко решить. Вы ответ знаете – получается экспоненциальное падение скорости. У Ньютона формулировка немного другая, но смысл, конечно, тот же.

Во втором и третьем разделах Ньютон усложняет задачу и берет силу как линейную комбинацию скоростей первой и второй степени, $F = -k_1 v - k_2 v^2$. Мы прекрасно понимаем, что в таком дифференциальном уравнении переменные разделяются и решение получается. Тем не менее, здесь Ньютон делает важный шаг. На этом примере он показывает, как можно создать численную схему расчета. Вы знаете, что Ньютон не только был отцом-основателем механики, но еще и наследил в таком разделе современной математики, как численное решение дифференциальных уравнений.

4 раздел. Понятно, что если тело будет двигаться по окружности под действием центральной силы, то наличие среды добавляет лобовое сопротивление. Траектория движения из окружности превращается в спираль и тело в конце концов падает на центр.

5 раздел. Выводится закон Бойля. Мы уже говорили, что у Бойля была мистическая концепция, близкая к Ньютону. Возникает статическая модель давления воздуха. Считается, что частицы (атомы, молекулы) отталкиваются друг от друга с помощью дальнодействующих сил. Этой моделью пользуется и Ньютон.

6 раздел. Затухающие колебания маятника рассматриваются как продолжение диссипативных сил.

Отметим последний важный *конструктивный* результат. Речь идет о гармонических волнах. Кстати, в 17 веке никто не рассматривал свет как синусоидальную волну. Даже сторонники волновой концепции рассматривали свет как поток каких-то импульсов. До синусоидальной волны догадались намного позже. А для звука гармоничность была естественной. Эти колебания даже можно было наблюдать на примере струн. И для такой гармонической волны Ньютон воспользовался идеями Бойля о пропорциональности плотности среды давлению и получил известную формулу для скорости звука:

$$c = \sqrt{\frac{p_0}{\rho_0}}$$

Причем, поскольку давление тогда мерили, плотность рассчитывали гидростатическим способом, то численное значение получить тоже могли. Правда, скорость звука оказывалась меньше, чем в реальности. Вы знаете, что правильная формула включает в себя коэффициент γ . Но она появилась только в начале 19 века, потому что именно тогда Лаплас догадался, что процесс является адиабатическим, а не изотермическим. Разумеется, в 17 веке о тепловых свойствах воздуха было ничего не известно.

Третий том – СИСТЕМА МИРА И ПРАВИЛА РАССУЖДЕНИЯ В ФИЗИКЕ

Система мира на основе новой физики, в том числе:

- Движение планет, Луны, комет и спутников Юпитера, Сатурна в Солнечной системе. Законы Кеплера;
- «Неправильность» лунных движений и теория возмущений;
- Связь движения тел у поверхности Земли с движением Луны. Подтверждение единой природы этих движений на основании измерений радиуса Земли Пикаром – всемирное тяготение;

- Методология физической теории. «... Не должно принимать в природе иных причин сверх тех, которые истинны и достаточны для объяснения явлений... Ибо природа проста и не роскошествует излишними причинами» - знаменитое «*гипотез не измышляю*».

Третий том тоже очень важный. В некоторых отношениях важнее, чем второй, поскольку в нем вместо дискуссий описывается применение метода Ньютона (изложенного в 1 томе) к планетам, кометам, спутникам Юпитера, Луне.

Луна здесь особенно важна, потому что расположена близка к Земле. А с другой стороны расположен другой мощный гравитирующий центр – Солнце. И получалась почти задача трех тел. Пытаясь решить эту проблему, Ньютон стал отцом-основателем еще одного математического подхода – теории возмущений. В последующие 200 лет развитие механики проходило как раз под знаком этой теории. Таким образом, теория возмущений зарождается у Ньютона, используется 200 лет, и потом снова возрождается в атомной физике.

В задаче о Луне главным телом является Земля. Луна движется под тяготением Земли, но при этом есть возмущающие эффекты. Во-первых, это влияние Солнца, а во-вторых – несимметричность Земли (приливные силы).

Надо сказать, что эта часть трудов Ньютона наиболее проблемная. И во втором издании расчеты движения Луны были модернизированы, поскольку это была самая сложная часть результатов.

Подчеркну еще один момент. Имело место сравнение теории с экспериментом. С всемирным тяготением понятно – надо сравнивать силу, действующую на падающий камень, и на вращающуюся вокруг Земли Луну. Для этого нужно точное значение радиуса Земли, который, как я уже упоминал, получил астроном и геодезист Пикар. Ему удалось с помощью геодезических методов измерить радиус Земли. Зная радиус Земли, несложно посчитать расстояние для Луны и силу тяготения, действующую на Луну. В итоге все сошлось. Это совпадение было очень существенным триумфом ньютоновской науки.

И, наконец, в третьем томе имеются общие методологические рассуждения. В отличие от Галилея, который мало рассуждал о самом методе, Ньютон уделяет внимание этой теме. Но нужно понимать, что именно он имеет в виду. Есть знаменитое высказывание «*гипотез не измышляю*». Оно отнюдь не означает, что нельзя строить гипотезы. В то время шла активная дискуссия о природе гравитационных сил. Картезианцам прежде всего не нравилось не само наличие гравитации, не ньютоновская математика, а отсутствие объяснения природы этих гравитационных сил.

Их не устраивало, что тела взаимодействуют мгновенно, через пустое пространство, со строго определенной силой. И Ньютон в вышеуказанной цитате излагает свою позицию по этому вопросу.

Развитие механики в 18-19 веке

Надо что-то сказать про дальнейшее развитие механики. Так как мы сильно ограничены по объему излагаемых материалов, то обсудим далеко не все аспекты этого развития.

Вообще говоря, историю физики имеет смысл изучать, только если вы можете вынести из нее какую-то мораль. Просто перечислять факты – занятие любопытное, но не всегда эффективное. Поэтому будем перечислять существенные моменты развития механики в 18-19 веках с пояснениями и обобщением некоторых мыслей.

Развитие аналитических методов механики

Во-первых, очень быстро развивался сам математический аппарат. Все признали заслугу Ньютона в разработке нового метода, признали его основные положения и законы. Но при этом стало ясно, что читать такие тексты просто невозможно. Геометрический метод изложения решения чрезвычайно неудобен. Поэтому было необходимо развить аналитические методы решения.

В 1736 Леонард Эйлер впервые пишет дифференциальное уравнение. Надо сказать, что у Эйлера сначала появились не удобные декартовы координаты, а своеобразные «естественные координаты», состоящие из касательной, главной нормали и бинормали. В такой системе получаются весьма тяжелые формулы. Тем не менее, именно в таких координатах были написаны первые дифференциальные уравнения.

1765 год. Уже получены дифференциальные уравнения в декартовых координатах. Развивается механика твердого тела, что является тоже очень важным этапом. Упомянем еще вариационные методы и перейдем к следующей важной вехе.

1788 год, «Аналитическая механика» Лагранжа. С одной стороны, это триумф аналитических методов. Чертежи перестали быть актуальными, стало возможным записывать дифференциальные уравнения, причем в любых координатах (у Лагранжа как раз появляются обобщенные координаты). Но был и недостаток этого подхода. Он связан с тем, что теория дифференциальных уравнений тогда не была особенно сильно развита. Так что удавалось решать задачи либо совсем простые, либо совсем своеобразные.

Из результатов Лагранжа получалось следующее. Если раньше вперед выдвигались законы сохранения, то после Лагранжа стало ясно, что у дифференциальных уравнений должны быть интегралы движения, по $2N$ штук на каждое уравнение (N – число степеней свободы системы, уравнение второго порядка). И получается, что у систем с большим числом степеней свободы имеется множество интегралов движения, которые друг друга обесценивали. Поэтому разговор про энергию и прочие импульсы несколько приутихли.

Следующий важный момент. Я всегда говорил, что нам важен не просто какой-нибудь математический метод и основы какой-то теории, а нам важно множество решенных задач. По сути дела, Ньютон сделал замечательный шаг – решил в общем виде задачу двух тел. Вроде это все замечательно и хорошо, но над головами вращается Луна, а ее движение уже является задачей трех тел. При попытке решить такую задачу возникает теория возмущений. Причем она успешным образом разворачивается – я имею в виду открытие Урана в 1781 году, Нептуна в 1846 году. Про последнее открытие как раз говорят – «открыли на кончике пера». Леверье и Адамс, используя теорию возмущений, рассчитали траекторию Нептуна.

Лапласов детерминизм и индетерминизм Пуанкаре

Но не было хорошего анализа сходимости рядов и устойчивости методов в теории возмущений. Тем не менее, чисто на практическом уровне, метод развивается. Его успехи вызывают интересные эффекты. Например, Маркс и Энгельс, под впечатлением от открытия Леверье, пытались перенести законы естествознания на законы общества.

Еще раньше получился замечательный вывод. В начале 19 века возникают новые математические понятия, многие методы наконец-то анализируются. В частности, возникла задача Коши. При определенных ограничениях на силу доказывается единственность решения задачи Коши.

Дополнительно сильно развиваются идеи атомизма, большим сторонником которого был Лаплас. Он распространил идею Ньютона о центральных силах на взаимодействие всех молекул, тем самым предполагая, что механика может описать всю природу. Основываясь на механической постановке всех взаимодействий и единственности решения задачи Коши, он в одной из своих работ он рассуждает следующим образом. Если бы существовал некий ум (демон Лапласа), который бы знал все начальные состояния системы, то этот ум смог бы однозначно просчитать наше будущее. Получается, что в нашей судьбе вообще никакой неоднозначности нет. Отсюда незамедлительно стали делать философские выводы, а сами рассуждения Лапласа называли «лапласовским детерминизмом».

Самое интересное здесь то, что в конце 19 века Пуанкаре высказывает большие сомнения в устойчивости решений, полученных методом теории возмущений. После Пуанкаре как раз и возникают нелинейная динамика, теория динамического хаоса. Он указал на то, что задача трех тел в общем случае не решается, сводится к появлению «нехороших» точек, в которых система абсолютно неустойчива. И получается вывод, прямо противоположный лапласовскому детерминизму.

Вывод можно сделать такой. На самом деле в механике нет никакого детерминизма, о котором говорил Лаплас. На самом деле, индетерминизм в классической механике даже выше, чем в квантовой. Потому что в квантовой теории все можно просчитать, а в классической – уже нет. Да, есть приближенные решения, полученные из теории возмущений и динамического хаоса. Но если вы ознакомитесь с книгами по нелинейной гидродинамике, то увидите, насколько там все сложно и непонятно.

Относительность в механике

Конец 19 века замечателен еще тем, что активизируется позитивистская философия. Она исходит из того, что физический метод очевиден. Демонстрируются базовые вещи – количественные эксперименты, их обработка в виде каких-то базовых соотношений с последующим индуктивным обобщением в виде законов. Позитивисты считали, что физика сама себе философия. Роль философов заключается в том, что они должны оптимизировать физические методы. Ведь за много десятилетий накопилось довольно много «шелухи», которую надо бы разгрести.

Позитивный пример. Мах, как представитель позитивистов, инициировал анализ классической механики. И в конце 19 века, в результате критического анализа, пришли к выводу, что говорить об абсолютном движении бессмысленно. Нужно вводить в классической механике набор эквивалентных, равноправных инерциальных систем отсчета. Это сделал Людвиг Ланге в 1886 году.

Отрицательный пример этой идеологии я уже приводил, но напомним еще раз (мы к нему еще и в третий раз вернемся). Речь идет о проблеме атомизма. К этому времени, в результате критики позитивистов, в молекулярно-кинетической теории Максвелла-Больцмана возник серьезный кризис. Против нее шли аргументы, указывающие на то, что никто не видел атомы и молекулы, тем более взаимодействующих по степенным силам. Поэтому позитивисты эти рассуждения признавали метафизикой и призывали выкинуть на свалку.

Лекция 5. 18 век – период «невесомых».

Как я вам и обещал, мы будем следовать тематически-исторической версии изложения материала. Поэтому сейчас мы будем рассматривать физику 18 века. Иногда будем затрагивать и другие временные периоды, чтобы не нарушать логику изложения. Даже 18 век мы рассмотрим не полностью, а сосредоточим внимание на развитии физики электричества, магнетизма, тепловых явлений и представлений об атомизме.

План лекции:

Развитие физики электрических и магнитных явлений

События, предшествовавшие формированию парадигмы:

- 1600 г, английский врач Гильберт, «О магните, магнитных телах и о большом магните – Земле»
 - Экспериментальный метод
 - Земля – большой магнит, магнитные полюса совпадают с географическими.
 - Неотделимость магнитных полюсов
 - Идея магнитной (магнитостатической) *индукции*
- Принципиально! Мысль о глубоком отличии электрических и магнитных явлений. Электрические – слабее магнитных, но более универсальны.
 - Вплоть до конца 18 века знали только об электричестве «от трения».
- 17 век. Герике (1730), Ньютон и Гуксби – активные эксперименты с электричеством «от трения». Свечение, искры.
 - *Отсутствие руководящей теории* приводило к весьма низкой эффективности опытов.
- 1729 год, Стефан Грей (член Королевского общества) пришел к выводу о существовании электропроводности.
- Шарль Дюфе, 1733-1737 – «стеклянное» и «смоляное» электричество. Притяжение и отталкивание
- Жаном Деагюлье, 1739-1742
 - Изобретение *Лейденской банки* – важнейшее событие в развитии физики электричества!
- 1745 – немец Клейст, 1746 – голландец Мушенбрек. Возможность накопления больших зарядов. Пересмотр концепции Гильберта о слабости электричества.
- 1747 – Уильям Ватсон, плоский конденсатор
- 1745 – Рихман в Петербурге измерял степень электризации по углу отклонения нити

Формирование парадигмы:

- Работы Бенджамина Фраклина (1747-1754)
 - Один вид электрической материи; идея сохранения электрического заряда

- Притяжение и отталкивание; положительное и отрицательное электричество
- Молния, как разряд; громоотвод
- Ульрих Теодор Эпинус – немецкий ученый, работавший в Санкт-Петербургской Академии Наук. Устранение картезианских вихрей
 - *Actio in distans*
 - Электростатическая индукция. Понятие потенциала и емкости
- Роберт Симмер – английский ученый.
 - Идея о двух электрических жидкостях (трудно было объяснить отталкивание обычной материи)
- Эйлер и Ломоносов продолжали придерживаться эфирных концепций близкого действия; «Письма к немецкой принцессе»

Гипотеза r^{-2} :

- 1750 – Эпинус; 1760 – Д.Бернулли; 1767 – Джозеф Пристли, эксперимент с полем внутри металлической сферы, которое равно нулю для сил r^{-2}
- 1771 – Генри Кавендиш
- 1785-1788 – 6 мемуаров Кулона по электричеству. *Точный эксперимент!* С крутильными весами; 1789 – мемуар по магнетизму

Теория потенциала: (начало 19 века)

- Пуассон, Грин, Гаусс

Возникновение физики постоянных токов: – рубеж 18 и 19 веков

- 1791 – опыт Л. Гальвани. Электрофизиологическое объяснение
- 1800 – Алессандро Вольта. Объяснение опыта Гальвани без применения биологии.

Развитие физики тепла

События, предшествовавшие формированию парадигмы:

- 1721 – Христиан фон Вольф обнаружил, что соль холоднее воды.
- Джозеф Блэк отмечал, что наиболее распространенной в 18 веке была компромиссная кинетически вещественная концепция тепла. Многие (например, Мушенбрек) связывали частицы тепла и света.
- 80ые годы – Лавуазье химически опроверг флогистоны, как причины горения. Лавуазье закрыл материю огня, но не теплород (существующий еще примерно 50 лет).
- 1700-1740 – возникновение точных количественных измерений в тепловых явлениях.
- 1740 – универсальный термометр Реомюра (на основе спирта).
- 1742 – ртутный термометр Андерса Цельсия.

Исследования по калориметрии:

- 1740 – Георг Рихман (тоже в Петербурге) определял температуру смеси.

- 1784 – финский физик Гадолин, понятие теплоемкости.
- 1755-1756 – Джозеф Блэк, «открытие» скрытых теплот (независимо к этому пришел немец Вильке).

Парадигма учения о теплоте по Блэку:

1. Существование двух мер теплоты (количество тепла и температура).
 2. Утверждение идеи теплорода.
 3. «Закон сохранения» теплорода.
- Блэк впервые четко указал на направление теплопередачи (необратимость тепловых явлений). Указал на жидкостные аналогии и минимальную достаточность в противовес картезианству.

Кинетическая теория тепла. Газы и атомизм:

- Идеи Декарта (17 век). Эйлер, Д.Бернулли, Ломоносов (18 век) – идеи о том, что тепло есть движение
- Работы Ломоносова в области физики
 - 1744 – «Размышления о причинах теплоты и холода»
 - 1748 – «Опыт теории упругости воздуха»
- Вывод закона Бойля
- Молекулярно-кинетическая теория газа. Аналог у Д.Бернулли
Давление воздуха никак не связано с теплом и температурой до начала 19 века
- 1759 – идеи хорватского философа Рожера Йозефа Босковича:
 - Атомы – точки, не имеющие размеров, но имеющие конечную массу.
 - Атомы являются центрами дальнодействующих сил.
 - В твердых телах атомы находятся в статическом равновесии.
- Заметим, что по Босковичу в мире нет ничего, кроме сил. Такая концепция повлияла на Фарадея при создании им концепции электромагнитного поля. По Фарадею, атомы – центры сил, но не дальнодействующих.

Причины упадка кинетической теории тепла после середины 18 века:

- а) Сложность количественного вывода калориметрических соотношений (еще не знали о сложностях молекулярно-кинетической теории)
- б) Разный метафизически-философский класс этих теорий.
- в) Сложность сочетания кинетических идей с тепловым излучением, открытым в конце 18 века:
 - 1777 – Шееле открыл «лучистое тепло».
 - 1790 – Пикте обнаружил фокусировку тепловых лучей зеркалом

- Гершель исследовал дисперсию тепловых лучей и ввел их аналогию со световыми лучами.
- трудно было совместить теорию истечения, преобладающую в тогдашней оптике, с кинетической теорией тепла.
- Химический атомизм, физика и химия газов в первой трети 19 века – аргументы в пользу существования атомов

18 век как период развития физики даже имеет название, «Период невесомых», которое оправдывает свое содержание. Дело в том, что в это время с большим успехом утвердилась теория Ньютона, о которой мы говорили на предыдущей лекции. Еще в 17 веке, помимо самой механики, существенно развивались и другие разделы физики (возможно, отставая по фазе от механики). Ученые пытались строить их, идейно опираясь на успехи классической механики. При этом получались определенные нюансы.

Мы видим, что гравитационное взаимодействие является универсальным. Все весомые тела в нем участвуют. А про другие виды взаимодействия, про другие физические явления, рассматриваемые в ту эпоху, такого сказать было нельзя. Например, те же электричество и магнетизм, к которым мы скоро перейдем, не являются универсальными. Не все тела участвуют в таком взаимодействии.

И постепенно такая тенденция утверждалась. Было представление об определенном невесомом «флюиде». Флюид был невесомым потому, что при помещении на тело электрического заряда, оно не меняет своего веса. Кстати, это единственный флюид, который сохранился до наших дней с 18 века. Все остальные флюиды со временем пришли в историческую негодность. Так вот, этот флюид попадает в некоторое тело, и после этого тело обретает способность вступать во взаимодействие.

При этом, по образцу гравитации, взаимодействие рассматривали с помощью центральных далекодействующих ньютоновских сил. Конечно, такое развитие было неединомоментным. Во всех разделах была борьба между сторонниками двух лидирующих направлений – борьба между картезианцами и ньютонианцами. Картезианцы ратовали за то, что нет никаких далекодействующих сил. Если даже они в каких-то успешных математических задачах как-то себя проявляют, то все равно надо объяснять такие явления с помощью какого-то механизма, чтобы в итоге все взаимодействия становились локальными (толчок, давление, трение). Этот механизм усиленно пытались найти.

Развитие физики электрических и магнитных явлений

События, предшествовавшие формированию парадигмы

Электричество развивалось примерно параллельно с механикой, на рубеже 17 века. В это время (1600 г) был опубликован знаменитый труд английского врача Гильберта «О магните, магнитных телах и о большом магните – Земле». Считается, что именно с этого труда началась физика электрических и магнитных явлений. Действительно, в этом трактате есть целый ряд важных утверждений, которые стали определенным руководством к действию. Хотя здесь и не получалось такой же науки, какой была та же механика. Да, были экспериментальные исследования. Но при этом количественные исследования были весьма затруднены.

Обсудим нюансы. Магнитные и электрические явления были хорошо известны с древности. В то время уже получил широкое распространение компас – магнитный прибор для определения направления в мореплавании. Кстати, в труде Гильберта впервые присутствует очень важное утверждение. Оно касается работы компаса и объясняет его тем, что земной шар является большим магнитом. И взаимодействие этого большого магнита с маленьким магнитом компаса приводит к выстраиванию стрелки компаса вдоль определенного направления. Говорилось в труде и о полюсах этого большого магнита, но считалось, что магнитные полюса совпадают с географическими.

Кроме этого, в этой работе был еще целый ряд утверждений. Гильберт говорил, что электрические взаимодействия являются универсальными взаимодействиями. Но, во-первых, это взаимодействие было слабым, а, во-вторых, это взаимодействие было таковым, что электрические свойства тел довольно быстро пропадают со временем (грубо говоря, минут за 10). Такое мнение было распространено потому, что единственным электричеством, известным в те и последующие (вплоть до конца 18 века) времена, было электричество «от трения». И с обычных тел заряд уходит за довольно короткое время.

Электрическое взаимодействие сводилось к притяжению (дилеммы «притяжение-отталкивание» еще не было). Добавьте сюда слабость этого взаимодействия и его уменьшение со временем – и получатся ключевые представления об электричестве в работе Гильберта.

Магнитные взаимодействия, в отличие от электрических, присущи не всем телам. Есть тела, которые участвуют в этом взаимодействии по природе – магниты. Магнитное взаимодействие считалось более сильным.

Еще очень важный момент. Хотя и имелась книга, в которой электричество и магнетизм объединялись, но, начиная с труда Гильберта, существовало четкое разграничение электричества и магнетизма. Даже несмотря на некоторую аналогию в этих явлениях, считалось, что ничего общего у них не имеется.

Все перечисленные аспекты оказали существенное влияние на последующее развитие этой науки.

Отметим общий интересный момент. Мы часто встречаем современные утверждения о том, что если обществу нужно что-то получить от науки, то оно непременно это получит. Можно услышать, например, рассуждения следующего типа. Поскольку автомобильные аккумуляторы достаточно слабые, а потребность в увеличении запаса хода есть, то ученые обязательно что-нибудь там наорут и разработают замечательные хорошие аккумуляторы. Но мы видим важный пример. Фактически, с 1600 года интенсивные попытки определить свойства электрических и магнитных явлений почти ни к чему не привели. Конечно, можно вспомнить Отто фон Герике, магдебургского бургомистра, который изобрел хороший насос, занимался электризацией от трения. Ньютон занимался исследованиями в области электричества. Его коллега Гуоксби проводил активные эксперименты в Лондонском Королевском обществе. Но руководящей теории не было. Это тоже мешало самой постановке эксперимента. Поэтому их эффективность была близка к нулю.

Зачатки новых результатов были получены только в тридцатых годах 18 века. Стефан Грей пришел к выводу о существовании электропроводности. Сейчас электропроводность по большей степени ассоциируется с металлами, но тогда была другая точка зрения. Считалось, что металл – пример материала, который очень трудно наэлектризовать. У Грея электричество проводили влажные веревки. Но такие результаты были изложены не слишком аккуратно, а исследования были весьма приблизительные. Поэтому все эти свойства переоткрывались несколько раз.

Мы сейчас знаем основные положения, которые, вслед за Куном, надо было назвать парадигмой физики электричества. Мы говорим о заряде, который сохраняется. О том, что есть два его знака, что имеется притяжение и отталкивание. Тогда все это формировалось неуверенно. Шарль Дюфе, после своих экспериментов, говорил о «стеклянном» и «смоляном» электричестве. Которые, по сути, и были двумя знаками заряда. Но опять-таки, эти исследования потом повторялись, а результаты были неяркими.

Дальнейшее изложение я хотел вести несколько нестандартным образом. Обычно здесь перечисляют через запятую исследования и заканчивают разговор открытием закона Кулона, который имел место в восьмидесятые годы 18 века. Но намного раньше

произошел кардинальный перелом в картине постепенного, медленного развития. Перелом произошел в сороковые годы и связан с открытием Лейденской банки. Современные студенты могут недооценить это событие, несмотря на его гигантское значение для физики электричества.

Что такое Лейденская банка? Брали стеклянный сосуд, в него наливали ртуть. Исследователь одной рукой держал сосуд. Стекло исполняло роль диэлектрика, а ртуть и гвоздь, который в нее вставляли – проводника. Эффект оказался в том (в современной интерпретации), что Лейденская банка получилась вариантом плоского конденсатора. Причем, конденсатора достаточно приличной емкости. Конечно, такой интерпретации создатели Лейденской банки не знали. Они чисто эмпирически наткнулись на эту конструкцию. Интересно, что это почти одновременно выполнили немецкий физик Кляйст и голландец Мушенбрек. Кляйст в своей работе говорил о необычайной силе электричества, возникающего в такой системе.

В чем смысл этого открытия? Оказывается, что каким-то образом можно накапливать электричество (не будем пока использовать термин «заряд») в очень больших количествах. Таким образом, здесь пересматривается положение Гильберта о «слабости» электричества. Кстати, этот опыт произвел большое впечатление не только на физиков и исследователей, но и на широкую публику. Вы даже можете в каких-нибудь учебниках найти информацию о не совсем гуманных демонстрациях. Людей выстраивали в цепочку и пропускали через них накопленный в Лейденской банке заряд. При этом люди дергаются, гримасничают. Говорят, так даже измеряли скорость прохождения электрического импульса.

Именно этот перелом и определил возможность реального исследования физики электричества. Теперь стало возможным накопить большой заряд и искать закономерности. Таким образом, то внимание, которое уделялось электричеству на протяжении 150 лет, ничего не стоило, пока не была получена такая конфигурация.

Довольно быстро выяснилось, что Лейденской банке можно убрать все лишнее (банку, кое-что другое). И буквально через год, в 1747 году, англичанин Уильям Ватсон упростил эту идею до плоского конденсатора.

Еще интересный момент. Нам очень важно отслеживать историю науки с нашей стороны. В то время (тридцатые-сороковые годы) стала довольно активно развиваться Санкт-Петербургская Академия наук, основанная Петром Первым. Был такой молодой отечественный исследователь Рихман, приятель Ломоносова. Он участвовал в исследованиях по воздействию электричества. Его эксперименты были интересны следующим. Когда ученые научились накапливать большое количество электричества, стало необходимо научиться его измерять. В принципе, еще из школьной физики

известно строение электроскопа, в котором заряд шарика пропорционален углу отклонения нити, на которой этот шарик подвешен. Эти исследования были проведены именно Рихманом.

Но, к сожалению, Рихман в своих исследованиях электричества зашел слишком далеко. Он погиб от удара молнии в эксперименте, связанном с атмосферным электричеством.

Формирование парадигмы

Далее, большое значение представляют события конца сороковых – начала пятидесятих годов 18 века. Парадигма в физике электричества должна была когда-то сформироваться. Когда мы говорим об электростатике, то сразу вспоминается закон Кулона. Но есть также понятия заряда, положительного и отрицательного, есть притяжение и отталкивание, есть закон сохранения заряда, есть проводники и диэлектрики – в общем, есть очень много всего. И вся эта система как раз и возникает в это время. Эти открытия, как я уже отметил, были простимулированы введением в оборот больших количеств электричества, которые накапливались в конденсаторах.

Бенджамин Франклин

Отметим двух конкретных людей, которым удалось преуспеть в этой области. Первым из них был Бенджамин Франклин. Он работал в ужасной глуши, на территории британской североамериканской колонии, которая сейчас является территорией США. Тем не менее, он многого добился в своих, прежде всего, экспериментальных исследованиях (1747-1754).

Здесь уже формируется парадигма. Появляется идея о двух типах заряда, о законе сохранения заряда. Правда, в то время использовалась одножидкостная модель электричества. В рамках этой модели положительный заряд рассматривался как избыток флюидов в теле, а отрицательный – как недостаток. В принципе, когда мы говорим о металлических телах, то, поменяв плюс на минус, получим вполне верное представления об избытке и недостатке электронов в отрицательно и положительно заряженных телах соответственно.

Есть еще один важный момент, связанный с Франклином. Нам сейчас легко говорить об атмосферном электричестве. Но до середины 18 века, до исследований Франклина, были совершенно разные точки зрения на вопросы «что такое гром?» и «что такое молния?». У вполне серьезных исследователей начала 18 века мы легко можем найти утверждения вроде «гроза представляет собой взрывы паров серы в атмосфере». Практически полностью отсутствовала идея того, что гром и молния

связаны между собой электрическим действием. Оно и понятно – чтобы получить электрические искры, надо создать большую разность потенциалов. И здесь мы снова убеждаемся в важности создания Лейденской банки. И с появлением таких конденсаторов аналогия между искрами в конденсаторе и молниями на небе не заставила себя ждать. Гипотеза атмосферного электричества впервые была сформулирована Франклином. Более того, он является автором громоотвода, который ныне обязателен при строительстве любого дома.

Ульрих Теодор Эпинус

Отметим, что в 18 веке, вследствие, наверно, грамотной политики государства, Россия стала одним из центров научных исследований. Вторым человеком, добившимся серьезных успехов в электричестве в сороковых-пятидесятых годах, был Ульрих Теодор Эпинус. Он был, фактически, российским исследователем, несмотря на немецкое происхождение. Эпинус много чем занимался в своей жизни. Он был одним из отцов-основателей серьезного шифровального дела в нашем государстве, но на досуге обратился и к физике. Можно считать, что он был сориентирован более теоретически, чем Франклин. Эпинус сразу подошел к электричеству с натурфилософской точки зрения и более четко сформулировал основные положения. Поэтому его можно считать одним из прародителей парадигмы физики электричества, наряду с Франклином.

Эпинус четко говорит о природе электричества. У него явно прослеживается идея “*action in distans*”, идея дальнодействия. Он считал, что взаимодействие между зарядами является дальнодействующей силой, такой же, как и закон всемирного тяготения. Кстати, он тоже предполагал закон r^{-2} , но в математической формулировке так его и не выписал, потому что прекрасно понимал, что не сможет проверить этот закон экспериментально. Так что эта идея оставалась на уровне аналогии с гравитацией. Но при этом были прекрасно видны различия – в частности, наличие двух знаков зарядов, наличие как притяжение, так и отталкивания. Идея центральных дальнодействующих сил и более четкая формулировка закона сохранения заряда – это и есть, безусловно, центральная заслуга Ульриха Теодора Эпинуса.

В шестидесятых и семидесятых годах развитие физики электричества ускорилося. Появляются новые понятия, которые и сейчас используются (например, емкость). Также появляются другие подходы, например, двухжидкостная концепция. Ее сторонники утверждали, что в одножидкостной концепции непонятно, откуда берется удержание частиц, из которых состоит тело. Ведь они все имеют один знак.

Далее, подчеркнем следующее. Конечно же, идеология дальнодействия хоть и была весьма популярной, все же была не единственной. Имелась также и картезианская

альтернатива. Ее наиболее яркий представитель – Леонард Эйлер. Он, с одной стороны, активно развивал классическую механику, много чего сделал для математического аппарата. С другой стороны, идеологически, он был противником последователей Ньютона. Кратко говоря, он был картезианцем. Он считал, что все взаимодействия локальны, а тела могут взаимодействовать только за счет непосредственного контакта. И гравитацию, электричество надо объяснять с помощью какого-то движения различных флюидов (кинетический подход). А неудачи этого направления связаны не с тем, что его поддерживают не слишком выдающиеся люди, а с тем, что было достаточно сложно вывести теорию на тот же математический уровень.

Действительно, ведь конструкция дального действия, в конце концов, получила вполне доступный исследователям математический аппарат. Эта математика позволила решить многие задачи. Особого успеха она достигла в конце 18 века. Именно эти триумфы обеспечили успех самой идеологии дального действия. А картезианская альтернатива на начальной стадии была хороша (механизмы всех явлений надо объяснять). И лишь с появлением адекватного математического аппарата была развита теория поля, а идеи локального взаимодействия получили второе дыхание.

Кстати, не только Эйлер, но и наш Ломоносов, который в значительной степени был сторонником многих идей Эйлера, исходил из картезианского объяснения этих явлений.

Гипотеза $1/r^2$

Теперь обсудим гипотезу r^{-2} . Конечно, в 18 веке физика уже не могла использовать натурфилософские методы, когда достаточно какой-нибудь абстрактной идеи для объяснения явлений. Нужны достаточно точные эксперименты. Было много попыток провести их. Упомянем Бернулли, Пристли. Дальше всех продвинулся Генри Кавендиш. Но его замечательный труд, который сейчас содержится во многих учебниках. В своем эксперименте он использовал вложенные сферы и результаты, которые были получены еще Исааком Ньютоном для гравитирующих тел. Речь идет об следующем утверждении. Если взаимодействие описывается законом r^{-2} , то вложенные сферы не будут взаимодействовать (при равномерном распределении электричества). При этом, в результате контакта электричество перетечет на внешнюю сферу.

Именно этот результат, с учетом доказательств Ньютона, был положен в эксперимент Кавендиша, который доказал, что если взаимодействие описывается законом r^{-n} , то n обязательно должно равняться двум. Но этот результат был опубликован Максвеллом лишь во второй половине 18 века. Сам же эксперимент Кавендиша не был известен его современникам и не произвел должного воздействия на

тогдашнее физическое сообщество. Поэтому основная заслуга в утверждении фундаментального закона электрических взаимодействий принадлежит Кулону.

Шарль Огюстен де Кулон

Обсудим базовые аспекты, касающиеся Кулона. Здесь надо упомянуть исследования Кулона, опубликованные в шести мемуарах (1785-1788), и отметить важные моменты этих исследований.

Во-первых, в науке еще оставалось сильное влияние идей Гильберта (в частности, разделение электричества и магнетизма). И у Кулона часть исследований посвящена фундаментальным электрическим законам, а часть – фундаментальным законам магнетизма. Кулон сделал вывод о том, что законы в этих явлениях структурно одинаковы. Его выводы могут на нас произвести впечатления, но, на самом деле, математический аппарат того времени был развит достаточно, чтобы суметь представить магнитный диполь в виде смещенных положительных и отрицательных зарядов. Оставалось соотнести северный полюс с положительными магнитными зарядами, а южный полюс - с отрицательными. Все математические и физические свойства взаимодействия диполей можно сравнить, а силу, действующую на диполи, можно даже измерить.

Еще один важный момент. Главное достижение Кулона, с моей точки зрения, заключается в создании замечательного прибора, который многими студентами недооценивается. Речь идет о крутильных весах. Действительно, чтобы оценить все достоинства крутильных весов, надо правильно оценить саму ту эпоху. Как вы помните, на первом курсе в практикуме есть задача с крутильными весами. К сожалению, в методичке фамилия Кулона совершенно не упоминается. Но там имеется формула пропорциональности момента силы, скручивающего проволоку, и угла поворота. И коэффициент пропорциональности (жесткости) содержит в себе геометрический вклад – длина проволоки стоит в знаменателе, а в числителе – четвертая степень радиуса. Таким образом, чтобы коэффициент получился небольшим, надо взять длинную и тонкую проволоку. К тому же, в такой геометрии возникает только «чистая» скручивающая деформация. Сжатия и сдвиг не проявляются. Так что это достижение Кулона никак нельзя недооценить.

К тому же, надо смотреть на историю развития с позиции тех возможностей, которые тогда были. Это сейчас вам обосновывают кулоновскую формулу через базовые формулы теории упругости, которой тогда и в помине не было. Те дифференциальные уравнения, которые мы знаем, возникли позже. Даже само понятие «модуль деформации», «модуль Юнга» возникло лет через 15-20 (во времена деятельности, как раз-таки, Юнга, 1800). А если говорить про саму теорию сплошной

среды и составление дифференциальных уравнений, то они появились вообще в тридцатые- сороковые годы 19 века. Таким образом, ценность этой формулы, как достижения Кулона, повышается.

Таким образом, крутильные весы получились очень точным прибором, который способен измерять очень малые моменты сил. Упомянем еще тот факт, что где-то в 1800 году Кавендиш с помощью метода Кулона смог определить гравитационную постоянную. Представьте, что если взять два тела, массой в килограмм каждый, расположить на расстоянии в несколько сантиметров, то насколько маленькой будет сила их гравитационного взаимодействия. Тем не менее, прибор, созданный в конце 18 века, позволял эту силу измерить с необходимой точностью. Результат Кавендиша оказался довольно близок к тому, что можно найти сегодня в справочнике.

Серия работ Кулона, в принципе, включала в себя всю электростатику, все базовые положения – закон сохранения заряда и закон Кулона.

Далее, в 1800 году возникает естественный верхний предел нашего изучения физики электричества 18 века. Мы видим следующий этап – открытие постоянных токов и гальванических элементов. Отметим заслуги Луиджи Гальвани, который первый начал эксперименты с чем-то похожим на гальванический элемент. Сам Гальвани объяснял свои результаты явлением животного электричества. Далее, Алессандро Вольта, в 1800 году, создал прообраз современного гальванического элемента и объяснил его действие без привлечения биологических механизмов. Мы к этим моментам еще вернемся, когда будем обсуждать физику электричества и магнетизма 19 века.

Сейчас перейдем к разговору о физике тепла.

Развитие физики тепла

Отступим до более раннего периода, до 17 века. Вспомним, что Аристотель говорил о теплоте как о некотором качестве, которое присуще определенным телам. Огонь и воздух обладают этим качеством, а земля и вода – лишены его (но, тем не менее, могут это качество приобретать). В какой-то степени, на аналогичной идее основывались первые исследователи тепловых явлений.

События, предшествовавшие формированию парадигмы

В новую эпоху, в 17 веке, рождаются две знаменитые конструкции, которые впоследствии друг с другом активно боролись. Первая идея заключалась в том, что тепло есть некий флюид (один из тех флюидов, которые активно развивались в теории физики 18 века, в «физике невесомых»), теплород (по-французски, калорИк). Отцом-

основателем можно считать Галилея, который не только ввел эту идею, но и попытался измерить тепло с помощью идеи теплового расширения. При нагреве лучше всего расширяется воздух, поэтому Галилей попытался его использовать, создав прибор для определения степени нагрева тел. Он представлял собой что-то похожее на трубку, которую в дальнейшем использовал Торричелли, только сверху располагался стеклянный сосуд, в котором находился большой объем воздуха. Вода, за счет создания разрежения, поднималась по столбу на разную высоту, в зависимости от температуры. Такой прибор назывался термоскоп Галилея.

Так как здесь возникает компромисс между измерением температуры и давления, то получить точные результаты таким образом невозможно (собственно, именно поэтому прибор называют термоскопом, а не термометром). Тем не менее, попытки измерения тепла начались еще в 17 веке.

Надо сказать, что история развития физики тепла в значительной степени похожа на историю развития физики электричества. Но, в отличие от нее, была проблема с точными измерениями. Фактически, до сороковых годов 18 века точных термометров создано не было. Хотя и в идейном отношении был некий консенсус, который заключался в том, что для измерения степени нагрева тел надо использовать явление теплового расширения.

Попытки сделать термометры наблюдаются с начала 17 по начало 18 века. Тем не менее, их эффективность оказывалась весьма низкой. Надо обратить внимание на то, что часто очень сложно преодолеть некоторые существенные технические детали. В учебных курсах мы не обращаем внимания на них. В то время, как с технологической точки зрения, преодоление таких трудностей было решающим фактором.

Например, когда термометр все-таки удалось создать, то оказалось, что на результаты измерения огромное влияние оказывает качество стекла. Далее, надо прокипятить ртуть, чтобы из нее вышел воздух. Стекло должно быть достаточно плотное, чтобы воздух не проходил. В общем, технологические аспекты, которые могут показаться несущественными, в реальности играли огромную роль.

Кстати, известные реперные точки предлагались еще в 17 веке – температура замерзания воды, температура кипения воды. Но использовать на практике эти точки не получалось, поскольку результаты измерения температуры приборами оказывались невоспроизводимыми.

Ситуация переломилась только в сороковых годах 18 века. В то время были наиболее популярны три термометрических шкалы – шкала шведского физика Андерса

Цельсия (1742), шкала Реомюра (1740) и Фаренгейта. Ртуть оказалась наилучшим агентом по той причине, что ее тепловое расширение было наиболее равномерным.

Исследования по калометрии

В 1740 году в Санкт-Петербургской Академии наук Георг Рихман, которого мы сегодня уже упоминали, тоже успел отметить в развитии физики тепла. Причем с него надо бы и начать. Дело в том, что в разбираемой нами теме крайне важны количественные эксперименты. Даже в школьных лабораториях часто присутствуют калориметры, с помощью которых исследуют тепловые явления, происходящие при смешении жидкостей разных температур, разного состава, и так далее. И эта идея теплового баланса впервые возникла в нашей стране, а уравнение теплового баланса впервые было написано Георгом Рихманом. Датировка этих экспериментов понятна – их можно было проводить сразу, как только появились более-менее точные термометры.

У Рихмана возникает формула температуры смеси, но при этом, обратите внимание, пока отсутствует понятие теплоемкости. Грубо говоря, если из школьной формулы убрать скрытые теплоты и теплоемкости, то получится как раз то, что возникло у Рихмана. Понятно, что отсутствие скрытых теплот оправдано отсутствием фазовых переходов. Но теплоемкости, конечно же, нужны. Рихман ставил довольно много различных экспериментов, но к идее о теплоемкости он так и не пришел. У него имелись отклонения от результатов, которые он хорошо объяснял тем, что часть тепла в процессе эксперимента уходит в окружающую среду.

Теплоемкости появились только через 40 лет в работах финского физика Гадолина. Скрытые теплоты открыли намного раньше, что связано с довольно большим количеством тепла, необходимым для плавления того же льда. В любом случае, в течение десятилетий после Рихмана исследователи постепенно разобрались с тем, как надо записывать уравнение теплового баланса.

При этом возникли две физические величины, которыми описывается тепло. Первая из них – температура, мера нагретости тел. Вторая – количество теплота.

Парадигма учения о теплоте по Блэку

Возникла довольно понятная и простая интерпретация – концепция теплового флюида, теплорода. Он проникает в поры тел, и чем больше в теле теплорода, тем оно горячее, его температура повышается.

Здесь можно провести аналогию с электричеством, где существовали понятия заряда и потенциала, которые друг с другом были связаны, но являлись различными

физическими величинами. Связь между ними обеспечивала физическая величина, называемая электроемкостью. Точно так же и в нашей теме. Есть температура, есть количество теплоты, а понятие теплоемкости (обратите внимание на терминологическое продолжение аналогии с электричеством), позволяет связать температуру с количеством теплоты. В электричестве имелось уравнение, отражавшее баланс заряда, а в теплофизике имелось уравнение баланса теплорода.

Таким образом, концепция теплорода получила существенный толчок за счет идейно простой интерпретации. При этом был достаточно понятен и математический аппарат. Также мы можем напрямую измерять уровень теплорода в теле (температуру) и количество теплорода в теле (сейчас эту величину называют внутренней энергией).

Прямое отношение к формированию такой парадигмы имеет англичанин Джозеф Блэк. Также он сформулировал «закон сохранения» теплорода, который просуществовал с пятидесятих годов 18 века до сороковых годов 19 века. Причем поначалу такую конструкцию всюду сопровождал триумф.

Обратите внимание на еще один существенный для нас момент. Уже в то время упоминалось некое свойство тепловых явлений, которое радикально отличало тепловые явления от всех остальных. Речь идет об определенном векторе направленности явлений (например, выравнивание температуры). Эта идея потом послужила основой возникновения второго начала термодинамики. Эту необратимость выравнивания температуры отметил еще Джозеф Блэк.

Такой аспект был воспринят по аналогии с жидкостью в сообщающихся сосудах. Представьте, что имеются сообщающиеся сосуды, в которые налита жидкость. Количеству жидкости ставилось в соответствие количество теплорода, а высоте жидкости – температура. Тогда, если открыто сообщение между сосудами, то общий уровень высоты жидкости, то есть температуры, со временем устанавливается. Вот такая аналогия.

Сейчас мы понимаем, что фундаментально доказать необратимость тепловых процессов таким образом нельзя. С точки зрения теории жидкости без трения, в системе сообщающихся сосудов определенный уровень никогда не установится – будут происходить вечные колебания (в лучшем случае). Прекращение этих колебаний однозначно связано с наличием трения и вязкости. Получается, что необратимость тепловых процессов пытались объяснить, в конечном счете, через эти же самые тепловые процессы, тем самым, тянув себя за волосы. Но в то время этот момент недооценивали, и поэтому такая аналогия казалась довольно хорошей.

При этом возникла следующая ситуация. Альтернативная теория – кинетическая теория, о которой мы пока мало говорили – не позволяла качественно объяснить само явление. Давайте обсудим это подробнее.

Кинетическая теория тепла. Газы и атомизм

Наряду с идеей о теплороде существовала (и достаточно давно) кинетическая теория тепла. С этой теорией, в первую очередь, связан Рене Декарт. Он вообще все пытался объяснить через движение флюидов. Причем речь идет именно о движении, а не о расположении. Даже само электричество он объяснял движением эфирных вихрей, которые создают взаимодействие тел.

То же самое в теплоте. Декарт не использовал теплородную жидкость, проникающую в поры тела и наполняющую его теплом. Он считал, что само тепло есть движение некоего эфира или других компонент, из которых состоит среда или тело. Такая кинетическая концепция явно присутствовала в идеях Декарта. Затем она получила определенное развитие. В частности, в 18 веке можно перечислить имена замечательных ученых – Леонард Эйлер, Даниил Бернулли, наш Ломоносов – они были сторонниками кинетической концепции. Причем, если говорить о Ломоносове, то он высказывал свои идеи еще до того, как появились представления о балансе тепла.

Исследования М. В. Ломоносова

В середине 18 века кинетическая концепция и концепция теплорода соперничали на одном уровне. В работе Ломоносова «Размышления о причинах теплоты и холода» рассматривалась кинетическая концепция, согласно которой тепло есть некое скрытое движения, при этом интенсивность тепла пропорциональна «живой силе» частиц, из которых тела состоят. Но здесь имеются определенные нюансы.

Во-первых, Ломоносов не был чистым картезианцем. У него присутствует некий атомизм, что удивительно, ведь у Декарта никаких атомов не было. Да, у него были структурные элементы, частицы, которые могли склеиваться, разламываться, изменяться – и они не были неделимыми атомами. У Ломоносова же присутствуют «нечувствительные физические частицы», которые явно проявляют атомистические свойства в том плане, что остаются неизменными. В дальнейшем, по Ломоносову, они могут сталкиваться, взаимодействовать, но при этом они будут сохранять свои свойства. Поэтому подход Ломоносова был достаточно своеобразен.

Прежде чем обсудить следующий момент, обратим внимание на следующее. Иногда возникает некоторая путаница (в учебной литературе тоже), связанная с тем, что авторы смешивают вместе такие вещи, которые смешиваются очень плохо. Они в

этом моменте сразу начинают повествование о молекулярно-кинетической теории. Конечно, тепловые свойства воздуха очень важны (особенно, тепловое расширение, на основе которого Галилей сконструировал свой микроскоп еще в 17 веке). Но они очень плохо диагностировались как минимум потому, что в то время даже не было понятия «газ». Более того, сам воздух, как смесь газов, удалось «разобрать» на составляющие благодаря химии, которая существенно проявилась только в конце 18 века. Именно тогда появились знаменитые газы – кислород, азот, и другие компоненты воздуха. До этих открытий о сложном составе воздуха не знали.

Далее, даже в самом простом учебнике по физике, где стоят только даты, вы увидите, что закон Бойля (или Бойля-Мариотта) появляется в середине 17 века, а все остальные законы – в десятых годах 19 века. Между этими законами прошло 150 лет. Почему так получилось?

Дело в том, что тепловые свойства очень сильно зависят от паров воды, которые в этом воздухе могут находиться. Действительно, влажный и сухой воздух обладают совершенно разными климатическими свойствами. Причина лежит в свойствах паров воды – они обладают огромной теплоемкостью. Помимо этого, в воздухе постоянно происходят фазовые переходы – пар переходит в жидкость, бывает даже возгонка. Без учета всех этих свойств влажный воздух представляет из себя *terra incognita*, непонятную субстанцию, в которой может происходить все что угодно.

В силу этих причин Ломоносов стремился отделить тепловые свойства воздуха от его динамических свойств. Другими словами, в законе Бойля давление – это одно, а тепловые свойства – совсем другое. Из сторонних соображений было понятно, что тепловые свойства газов и твердых тел надо было объяснять кинетически. Ломоносов, будучи атомистом, использовал предположение, заключающееся в том, что тепловое движение сводится к вращательному движению атомов, а давление – это поступательное движение.

Ломоносову удалось получить замечательный для своей эпохи результат, связанный с упругими свойствами воздуха (1748). В своей работе он, независимо от Даниила Бернулли, вывел кинетическим образом закон Бойля. Вспомним, что атомист Бойль обосновывал свой закон статическим образом. Он считал, что молекулы отталкиваются друг от друга за счет дальнотействующих сил отталкивания, в результате чего возникает сила, действующая на стенку – давление.

В 18 веке появилась идея, что давление можно объяснить кинетическим ударом. В учебниках средней школы приводится вывод «основного» (весьма высокопарное название) уравнения молекулярно-кинетической теории газов, в котором выводится выражение для давления из потоков воздуха с одинаковыми скоростями. У Ломоносова

вывод немного интересней. Он в определенной степени учитывает столкновение частиц, говорит, что они обмениваются при столкновениях как теплотой (как шестеренки при сцеплении), так и поступательным движением.

Сам Ломоносов пытался отделить такое поступательное движение от теплоты. Современный читатель может удивиться этому – ведь вас еще в школе, а потом и в курсе МКТ учили, что имеет место теорема о равномерном распределении кинетической энергии по степеням свободы. Разумеется, во времена Ломоносова этой теоремы не было, она является прямым следствием распределения Максвелла-Больцмана (1868).

Идеи Р. Й. Босковича

Продолжим мысль о развитии атомистических идей. Важными аспектами были метафизические достижения мыслителей 18 века. В то время физика еще не закрылась от внешних влияний. Здесь надо вспомнить хорватского философа Ружера Йозефа Босковича, который не проводил напрямую физических исследований. Но, тем не менее, опубликованные им труды во многом дополняли древнюю атомистическую конструкцию, которая существовала с античных времен и приобрела сторонников в Новое время (включая Ньютона и того же Бойля).

Боскович, смотря на развитие физики 18 века со стороны, предложил построить конструкцию по-другому. Если говорить на современном языке, то у Босковича атомы (которые, безусловно, есть) являются особыми точками пространства - центрами сил, которые на больших расстояниях ведут себя как r^{-2} , а на малых расстояниях уходят в бесконечность (обеспечивая отталкивание). При этом в промежуточных расстояниях возникают переколебания – несколько синусоид (5-7). Такая конструкция допускает наличие точек равновесия. Атомы Босковича могли находиться в равновесии, образуя тела.

Подобная конструкция удовлетворительно стыковалась с идеологией Ньютона (атомы – центры дальнодействующих сил). Но имел место один интересный момент. Такая теория, опубликованная в середине 18 века, оказала сильнейшее влияние на одного из отцов-основателей совершенно противоположной, картезианской идеологии – идеологии поля. Через 90 лет после Босковича у Майкла Фарадея возникает идея электромагнитного поля. Фарадей в значительной степени был вдохновлен идеями именно Босковича.

Здесь любопытен такой момент. У Босковича тела превращались в особенности пространства, при этом сами исчезая. Пространство заполнено только силами. Это похоже на полевую конструкцию, которую строит Фарадей.

Таким образом, атомизм определенным образом развивается. Но в конце 18 века кинетической теории был свойственен определенный упадок.

Причины упадка кинетической теории тепла после середины 18 века

Во-первых, имеет место безусловный успех математически последовательной теории, которая была связана с калометрией и балансом тепла. Здесь, конечно, пока нет знаменитых исследований по теплопроводности Фурье (начало 19 века), но ресурс теплородной концепции еще не исчерпан. При этом МКТ обладала определенными трудностями. Главная из них заключалась в том, что эта теория была, в общем-то, качественной. Не было возможности рассчитать что-то количественно. Да, Бернулли и Ломоносов вывели закон Бойля. Но кажущейся нам очевидной связи закона Бойля с уравнением Менделеева-Клапейрона тогда не могло быть. А других количественных соотношений из кинетических соображений во второй половине 18 века получено не было. Таким образом, у этих двух теорий был разный статус.

К тому же, кинетические теории обладали большим недостатком, который проявлялся и в 19 веке. Они оказались очень сложными с математической точки зрения. Это мешало утверждению теории Максвелла-Больцмана.

Далее, важную роль сыграло открытие «лучистого тепла», инфракрасных лучей, если по-современному. Если мы стоим на позиции вещественного тепла, теплорода, то можно считать, что лучистое тепло есть излучение теплорода в пространство. То есть, теплород может не только течь из одного тела в другое при контакте, но может и передаваться через пустоту.

Интересно, что в это же время имело место развитие оптики. Наиболее признанной концепцией в оптика была концепция стечения. Оптический свет есть поток каких-то частиц, флюидов. И получается, что если теплород, как лучистое тепло, обладает свойствами, похожими на свет, то в этом ничего особенного нет – это просто некий аналог. И действительно, в 1790 году было открыто возможность фокусировки, отражения и дисперсии тепловых лучей.

Таким образом, к концу 18 века мы видим определенный триумф ньютонианских конструкций, в противовес картезианским. В электричестве и магнетизме утвердилось концепция электрического флюида и дальнедействующих сил, а в теплоте – концепция стечения. При этом где-то маргинализировались идеи о кинетической природе тепла.

В заключение отметим следующий момент. Часто, обсуждая идеи атомизма, слишком рьяно выстраивают в один ряд достижения древних натурфилософов с положениями более современных атомистических концепций. Это надо делать очень

аккуратно. Стоит иметь в виду, что вплоть до начала 19 века, атомизм был совершенно метафизической, натурфилософской идеей. Для чего он нужен – вопрос уже другой. У Платона имелся математический атомизм, похожий на геометрический атомизм (идея многогранников как основа объяснения наличия четырех мировых начал). Также и у Босковича (уже сильнее связано с физикой). Но это все равно философский атомизм, в котором почти нет прямой связи с экспериментом.

Естественнонаучный атомизм возникает только в начале 19 века. Обсуждаемый нами период (конец 18 века) отмечен бурным развитием химии. Химия, как наука, стала утверждаться несколько позже физики, как раз в это время. Постепенно начинает утверждаться идея химического элемента, удастся разложить воздух на составляющие. Возникают идеи простого вещества, химически сложного вещества, образованного в результате химической реакции.

Только в начале 19 века, в результате достижений замечательного английского физика и химика Джона Дальтона, четко возникает понятие химического элемента. И это понятие уже не такое метафизическое, как у Бойля. Начинают утверждаться такие идеи, как идея постоянства состава химических соединений и идея кратных весовых отношений. Возникает замечательное проявление химического атомизма – атомные веса элемента.

Лекция 6. Электродинамика дального действия и волновая оптика

Тема сегодняшней лекции – электродинамика дального действия и волновая оптика, первая половина 19 века.

План лекции:

Постоянные токи. Электродинамика дального действия

- Начало эпохи ломки перегородок между разделами физики.

Гальванический элемент. Постоянные токи:

- 1790 – Луиджи Гальвани, животное электричество.
- 1795-1800 – Алессандро Вольта, контакт разных проводников (в том числе, жидких), создание *гальванического элемента*. Вольтов столб.

Искра, вольтова дуга, тепловой эффект, отсутствие количественной меры.

Химическое действие тока, электролиз

- Хемфри Деви, разложение воды и пропорциональные выделения газов. Связь электричества и химии.

Магнитное действие электрического тока:

- 1820 – Ханс Эрстед. Опыт, связывающий электричество и магнетизм.
- Исследования Био и Савара. Явление уменьшения взаимодействия при удалении от прямого провода по закону r^{-1} .
- Араго. Создание электромагнита.

Взаимодействующие токи Андре Мари Ампера, 1820-1826.

- Центральные силы между элементами тока.
- Гипотеза Ампера

$$d\mathbf{F} = \mathbf{r}_{12} \frac{dl_1 dl_2}{r_{12}^3} f(\varepsilon, \vartheta_1, \vartheta_2) ds_1 ds_2$$

Открытие закона Ома:

- 1825-1827 – Георг Симон Ом.
- Крутильные весы + нормированный источник тока (термопара).
- Основные физические величины для токов – сила тока и напряжение.

Явление и закон электромагнитной индукции:

- 1831 – Майкл Фарадей.
- 1845 – Франц Нейман.

$$\frac{R dq}{dt} = -a \frac{d\Phi}{dt}; \Phi = I_2 a \oint_{L_1 L_2} \frac{dl_1 dl_2}{r}$$

Электродинамика Гаусса-Вебера:

- 1846 – электродинамика дального действия Вильгельма Вебера.

- Электрический атомизм. Природа тока.
- Относительность достигается за счет симметрии зарядов.

$$\mathbf{j} = \sum_{+/-} e_i n_i \mathbf{v}_i; \quad \mathbf{v}_+ = -\mathbf{v}_-; \quad \rho_+ = e_+ n_+ = -\rho_- = e_- n_-$$

$$F = \frac{de'de}{r^2} \left[1 - \frac{a^2 v^2}{16} + (a^2 r/8) \frac{dv}{dt} \right]$$

- Появление скорости света в теории. Опыты Вебера и Кольрауша, 1856 год. $c = 4/a$.

Развитие оптики до середины 19 века.

Корпускулярная и волновая оптика 17 века:

- Оптика Ньютона. Корпускулярная гипотеза. Цвет, дисперсия, кольца Ньютона
- Декарт, Гюйгенс и Гук. «Бесцветные волны».

Открытие конечности скорости света в астрономических наблюдениях:

- 1675 – Олаф Ремер.
- 1728 – Джемс Бредли, по абберации света звезд, $\tan \delta = v/c$.

Влияние движения источника света на оптические явления:

- 1810 – Араго.

Измерение интенсивности света. Фотометрия:

- 1750-1760 – Пьер Буге, Иоганн Ламберт.

Идеи Эйлера о природе цвета:

- Аналогия со звуковыми волнами, цвет как частота гармонических волн (в «Письмах к немецкой принцессе», вышедших в Петербурге в 1768-1773 годах).

Интерференция волн Томаса Юнга, объяснение колец Ньютона и опыт Юнга в 1800 году:

- Аналогия с волнами на воде.
- Зачатки теории упругого эфира. Модуль Юнга. $c = \sqrt{E/\rho}$
- Объяснение интерференции (кольца Ньютона, опыт Юнга) и дифракции по Юнгу.
- Продольные волны.

Открытие поляризации при отражении света (1807):

- 1808 - Малюс и Брюстер.
- Позиция Лапласа.

Оптика Френеля:

- Дифракция. Принцип Гюйгенса-Френеля (1815, 1818).
- Идея поперечности колебаний светового эфира.
- 1823 – теория рефракции на плоской границе 2 сред. Поляризация.

$$c = \sqrt{E/\rho}; \quad E = const; \quad \rho - var$$

- «Странные» граничные условия (разрыв нормальной компоненты).
- Кристаллооптика, двойное лучепреломление, эллипсоид упругости.

$$E - \text{var}; \quad \rho = \text{const}$$

- Частичное увлечение эфира движущейся средой.

$$\bar{c}_1 = c_1 + (1 - 1/n^2)u$$

Формирование математической теории упругости и оптика Френеля

- 1827 – Навье

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{e}}{\partial t^2} = 3n \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{e} - n \operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{e}$$

- 1828 – Коши, теория упругости в изотропной среде

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{e}}{\partial t^2} = (k + 4n/3) \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{e} - n \operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{e}$$

- Проблема – наличие продольной волны

$$c_{\parallel} = \sqrt{\frac{k + 4n/3}{\rho}}; \quad c_{\perp} = \sqrt{\frac{n}{\rho}}$$

- 1837 – модель эфира Мак Куллаха. Система гироскопов.
- 1837 – Грин. Последовательные граничные условия.

Альтернатива Френеля:

- Реалистичная теория сплошной среды и противоречие эксперименту, или:
- «странный» теория Френеля и успешное подтверждение на опытах.

Корпускулярная и волновая оптика 17 века

При изложении материала этой лекции нам важно не просто перечислить какие-то факты, но и уловить какую-то мораль. Как вы помните, 18 век можно назвать эпохой «невесомых». Главной особенностью того периода было развитие разных разделов физики по аналогии с небесной механикой в частности и с механикой Ньютона вообще.

Но, несмотря на аналогию, некая автономность в развитии все же присутствовала. У электричества и магнетизма были свои электрические жидкости, в теплоте утверждался теплород. И между этими разделами физики были довольно жесткие и ощутимые перегородки. Конечно, стремление к объединению физики во что-то единое всегда сохраняется, но за счет развития дополнительных (по отношению к небесной механике) разделов в физике мы все же видим возникновение неких перегородок.

Эпоха, о которой мы сегодня будем говорить (первая половина 19 века), отличалась обратным процессом. Перегородки начинают ломаться. И сегодня мы

успеем разобрать две больших темы – постоянные токи с электродинамикой
дальнодействия и оптику.

Постоянные токи и электродинамика дальнодействия

Гальванический элемент. Постоянные токи

На предыдущей лекции мы разбирали развитие физики электричества и магнетизма. Остановились на том, что в последнем десятилетии 18 века произошло важное событие – открытие постоянных токов и, в первую очередь, их источников – гальванических элементов. Это произошло в результате действия двух итальянских физиков – Луиджи Гальвани и Алессандро Вольта.

Если говорить кратко, то Вольта придумал то, что мы сейчас называем гальваническим элементом. Сегодня у каждого из вас он лежит в кармане, в составе сотовых телефонов и смартфонов. На прошлой лекции мы упомянули, что Луиджи Гальвани, открыв явление животного электричества, объяснял его возникновение биологическими механизмами. Заслуга Вольты заключается в том, что он убрал всех биологических агентов, оставив лишь электролиты и металлы.

После гальванического элемента появился Вольтов столб. Он представляет собой набор последовательно соединенных гальванических элементов, чем достигалось существенное усиление наблюдаемых явлений.

В то время не было четкого понимания того, что происходит при замыкании разъема гальванического элемента, и в этом надо отдавать себе отчет. У нас, при словосочетании «постоянный ток», в голове возникает то, чему нас учили еще в школе – движение зарядов, сила тока, и так далее. Но непосредственно эти процессы не наблюдаемы.

При попытке замкнуть контакты можно наблюдать «продленную» искру, похожую на ту, что возникала между пластинами лейденской банки. «Продленность» заключается в том, что искру можно было наблюдать каждый раз при замыкании контактов, в то время как лейденская банка разряжается один раз.

Поэтому в тот период (начало 19 века) не было единой точки зрения на те явления, которые мы сейчас относим к физике постоянных токов. То ли это какой-то процесс, или же некое состояние, вроде поляризации в электростатике. Ясности не было, но были признаки и того, и того. Со временем многие стали склоняться в сторону процесса. Причиной тому послужили некоторые проблемные эффекты.

Например, искра иногда переходила в вольтову дугу, которая могла светиться довольно долго. Далее, имел место тепловой эффект при замыкании цепи. Количественно эти явления описываются законом Джоуля-Ленца, но он появился только в тридцатых годах 19 века, намного позже. Поэтому нагрев объясняли выделением теплорода.

Стоит упомянуть химическое воздействие. Однако, здесь не нужно опережать события. При словах «химическое действие», «электролиз», мы снова вспоминаем изучение этого вопроса в средней школе – закон Фарадея (тридцатые годы 19 века), заряд, протекший по электролиту. Надо понимать, что в начале 19 века само понятие химического элемента было не вполне устойчивым. К тому же, ток никто мерить не умел, и количественно связать его с химическими процессами тоже не удавалось.

Но все же сами электрохимические явления наблюдать можно было. Выдающийся британский химик Хемфри Деви (в его лаборатории впоследствии работал Майкл Фарадей) наблюдал разложение воды и выделение водорода и кислорода в определенных пропорциях, которые к тому времени были уже известными газами.

Магнитное действие электрического тока

В конце концов, дело дошло до самого главного явления в этой области. В 1820 году Ханс Эрстед открыл магнитное воздействие постоянного тока. Это открытие означало слом перегородки между электричеством и магнетизмом. Как вы помните, в 1600 году Гильберт в своем труде утверждал, что электричество и магнетизм – совершенно разные явления. И у Эрстеда, наконец, эта связь появляется снова, лишь укрепляясь со временем. Далее, в пятидесятых-шестидесятых годах уже уверенно возникает электромагнетизм, как некое единое понятие.

В опыте Эрстеда магнитная стрелка поворачивалась при замыкании цепи гальванического элемента. Это явление сразу привлекло много внимания. В дальнейшем, Био и Савар обнаружили зависимость r^{-1} между отклонением стрелки и расстоянием до прямого провода. И, если учесть принцип суперпозиции, то возникает снова взаимодействие r^{-2} . Действительно, вспомните задачу из электростатики с заряженным проводом. Воздействие такого провода на сторонний заряд будет падать по закону r^{-1} . Закон r^{-2} работал для точечных зарядов.

Французский физик Араго сделал электромагнит, что тоже было существенным моментом.

Взаимодействующие токи Андре Мари Ампера

К тому времени к этим исследованиям подключается Андре Мари Ампер. Он довольно длительное время (1820-1826) занимался исследованиями в этой области. В результате возникла некоторая концепция. Давайте ее обсудим, чтобы избежать часто возникающей путаницы.

Концепция взаимодействия токов, которую придумал Ампер, в значительной степени имела переходный характер. Здесь, во-первых, имеет место слом перегородок, о котором мы уже говорили. Во-вторых, в начале 19 века мы видим определенный возврат от ньютоновских концепций дальнего действия к некоторым идеям Декарта и картезианцев – движущийся эфир как переносчик взаимодействия, локальность взаимодействия.

$$d\mathbf{F} = \mathbf{r}_{12} \frac{dl_1 dl_2}{r_{12}^3} f(\varepsilon, \vartheta_1, \vartheta_2) ds_1 ds_2$$

Концепция Ампера как раз была промежуточной. Ампер вводит идею элементов тока. По-прежнему совершенно непонятно, что они собой представляют. Обратите внимание, что формула выше совершенно не похожа на тот закон, который писал Ампер в двадцатые годы 19 века. Говоря об элементах тока, сейчас мы уверенно имеем в виду движение зарядов, вводя понятия силы тока и плотности тока. Ампер к этому понятию подходил осторожно, как и многие исследователи после него. Да, уже появились идеи о том, как можно измерить «силу» тока, используя магнитное взаимодействие. Но природа тока была по-прежнему туманна.

Таким образом, Ампер не до конца раскрывал свои «элементы тока». Максвелл, кстати, в этом вопросе тоже недалеко ушел. Если вы откроете его труды (вполне доступные для чтения), то обратите внимание на то, что он не очень четко говорит о природе тока. Несмотря на систему уравнений, несмотря на то, что из них будет следовать уравнение непрерывности для ρ и \mathbf{j} , четкое объяснение природы тока мы там не увидим.

Тем не менее, гипотеза Ампера работает. Элементы тока при этом являются векторами. И самое главное здесь – понять, что речь идет о тех же центральных силах, которые фигурируют и в законе всемирного тяготения. Их сходство имеет несколько причин. Здесь и вид зависимости r^{-2} , и центральный характер направленности сил, то есть силы взаимодействия элементов тока направлены вдоль одной прямой (при этом имеет место как притяжение, так и отталкивание).

Вы можете возразить, вспомнив известную формулу для силы Ампера с двойным векторным произведением. Записанная такой формулой сила явно не является центральной. Здесь надо иметь в виду следующее. Если мы будем сравнивать оригинальное амперовское выражение с формулой из современного справочника, то увидите, что при интегрировании по замкнутому контуру все отличия пропадают.

Таким образом, взаимодействие токов укладывается в концепцию аналогии с ньютоновской механикой. А зависимость силы от скорости была вообще не актуальна по той причине, что скорости в силе тока нет. Единственное, что возникает в этой зависимости нового – наличие углов $\varepsilon, \vartheta_1, \vartheta_2$.

Давайте еще немного задержимся на Ампере, чтобы обсудить следующую типичную ошибку. Еще в школе часто встречается так называемая «гипотеза» Ампера. Все хотят довести свою идею до конца. Если в 17, 18 веках считалось, что электричество – одно, а электричество – другое, то Ампер предполагает, что все постоянные магниты представляют собой конструкции, в которых протекают скрытые от наших глаз невидимые токи. И весь магнетизм мы можем поделить на явный магнетизм, возникающий при протекании макроскопических токов, и на скрытый магнетизм, проявляющийся в постоянных магнитах, имеющий свое начало в микроскопических токах. Кстати, в такой гипотезе прослеживается нечто вихреобразное, идейно похожее на вихри Декарта.

Конечно, у такой гипотезы имеется немало проблем. Например, если вы возьмете кусок намагниченного железа, то для обеспечения его намагниченности в нем должны протекать просто гигантские токи. Тем не менее, эта гипотеза была важной ступенью в развитии физики электромагнетизма.

Не могу отметить странность того, что эта гипотеза преподносится в школьных учебниках как современная концепция. На самом деле, любой специалист в области физики твердого тела прекрасно знает, что магнетизм в железе, хrome и других магнитных веществах связан со спинами электронов и не имеет чисто токовой природы.

Открытие закона Ома

Мы наблюдаем довольно уверенное объединение электричества и магнетизма, которое уже является заявкой на единую электродинамику. Но в 1825-1827 годах Георг Симон Ом открывает знаменитый закон Ома. В нем нас могут заинтересовать несколько моментов.

Во-первых, представляет интерес сам метод эксперимента Ома. Он проводил достаточно тонкие измерения, в том числе используя крутильные весы, важность которых мы уже обсуждали. Во-вторых, интересен метод изменения напряжения. Ведь для проверки закона Ома нужно иметь нормированный источник тока. К этому времени удалось сконструировать более надежный источник напряжения, чем гальванический элемент – термопару. Вы знаете, что если ее разъемы поддерживать при фиксированных температурах, то разность потенциалов между разъемами тоже будет постоянна. Если сделать набор таких источников тока, можно нормировать подаваемое напряжение.

Наконец, стоит отметить, что именно в работах Ома возникает стандартный набор величин, использующийся в макроскопической физике – сила тока, напряжение, и так далее. Да, элементы тока встречались еще у Ампера, но у него была неопределенность в измерении этих самых элементов тока. Ому же удалось четко дать определения вышеперечисленных величин.

Те, кто внимательно изучал электродинамику, заметят следующий момент. Если к закону Ампера и Ома добавить закон электромагнитной индукции (который был открыт как явление Фарадеем в 1831), то из них, в принципе, можно построить всю физику квазистационарных токов (токов без электромагнитного излучения).

Электродинамика Гаусса-Вебера

Если вы посмотрите стандартные учебники по истории физики, то вы наткнетесь на отношение «свысока» к деятельности немецкого физика Вильгельма Вебера. В 1846 году он опубликовал труд, который лег в основу электродинамики дальнего действия. Такое отношение историков физики к Веберу объясняется тем, что его труд предшествовал электродинамике Максвелла, которая была более продвинутой теорией. Но на самом деле, ситуация была несколько другой.

Кстати, именно из обсуждаемых нами работ появилась замечательная система единиц, которую сейчас почему-то загоняют под лавку – гауссова система единиц. Во времена моего студенчества (70-80 годы прошлого века), все теоретики пользовались именно этой системой единиц. И важно понимать, что единая система единиц подразумевала под собой единую идеологию.

Самым главным моментом здесь является идея «электрического атомизма». В отличие от как предшествующих исследователей, так от Максвелла, в работах Вебера однозначно определяется природа тока. Была введена плотность тока как $\mathbf{j} = \sum_{+/-} e_i n_i \mathbf{v}_i$, где e – заряд, n – концентрация, v – скорость. Вебер рассматривал ток как движение заряженных тел. Вопрос точности этих тел до конца выяснен не был.

Сейчас, конечно, можно писать δ -функции, но в 19 веке функций Дирака быть не могло.

Конечно, ничего нельзя было объяснить, взяв только один сорт заряда. И если взять два типа заряда, у каждого из которых есть своя скорость, то получится, во-первых, электрически нейтральная среда, а во-вторых, течение тока. Забегая вперед, скажем, что Вебер, при продвижении своей теории, выяснил, что если взять общий случай, то в результате получатся силы, зависящие от скорости и даже от ускорения. А относительно чего считалась скорость – из работ Вебера неясно. Таким образом, в его работах отсутствовала относительность.

За счет того, что никто не видел эти обеспечивающие ток частицы, Вебер имел в распоряжении определенный произвол. Он хотел, чтобы система зависела только от относительных расстояний между частицами (как в законе Кулона), от относительных скоростей и ускорений. Но уж никак не от абсолютных. Для достижения этого, он придумал своеобразный прием – ввел симметрию. То есть, движущиеся по проводу заряды разных типов одинаковы, имеют одинаковую скорость, но направленную в противоположных направлениях:

$$v_+ = -v_-; \rho_+ = e_+ n_+ = -\rho_- = e_- n_-.$$

Сейчас, конечно, мы знаем, что это не так. В металлическом проводнике ток переносится подвижными электронами, положительные заряженные ионы при этом неподвижны.

Следующим аспектом теории Вебера были фундаментальные силы взаимодействия зарядов. Предполагалось, что все окружающие нас тела состоят из нейтральных и заряженных частиц. Заряженные частицы взаимодействуют с силой:

$$F = \frac{de'de}{r^2} \left[1 - \frac{a^2 v^2}{16} + (a^2 r/8) \frac{dv}{dt} \right]$$

Обратите внимание на центральность сил, они направлены по вектору \mathbf{r}_{12} . Далее, обсудим слагаемые в квадратных скобках. Первое из них соответствует закону Кулона при отсутствии скоростей. Во втором слагаемом стоит квадрат скорости, или производной относительного расстояния между частицами и постоянные коэффициенты. При определенном выборе системы единиц из второго слагаемого получится правильный закон Ампера. Третье слагаемое соответствует закону электромагнитной индукции. Как видите, в него уже входит ускорение.

Интересно, что вся эта конструкция зависит только от одной константы a . Ее размерность очевидна из второго слагаемого и составляет с/м. Эта константа у нас

потом еще встретиться. Особо догадливые слушатели могут уже сейчас понять, что в нее должно входить. Для самого Вебера было очень важно провести эксперимент и реально посмотреть, чему будет равна эта константа.

Такой эксперимент был проведен Вебером и Кольраушем спустя 10 лет, и значение этой константы получили. Нам сейчас не так важно значение самой константы. Из выражения для силы видно, что a – такая скорость, при которой сила Кулона равна силе Ампера. И если рассмотреть два параллельных потока с заряженными частицами, то они будут отталкиваться по Кулону и притягиваться по Амперу. При определенной скорости сила их взаимодействия обратиться в ноль. Оказывается, что это и есть скорость света. Но, стоит отметить, что мысли о связи оптических и электромагнитных явлений в этот период пока не возникают.

Заметьте, что в теории Вебера довольно мало лишних гипотез. Появилась, по сравнению с теорией Ампера, определенность во многих понятиях. Таким образом, теория Вебера, которая еще называется электродинамикой дального действия, существенно продвинула вперед развитие физики электромагнетизма. Такая электродинамика объясняла все известные на тот момент (середина 19 века) явления, связанные с квазистационарными токами. Именно эту теорию надо сравнивать с теорией электромагнитного поля, которую создали Фарадей и Максвелл. Однако на этом месте мы останавливаемся, само сравнение проведем в следующий раз.

Развитие оптики до середины 19 века

Так как про развитие оптики мы не говорили вообще, то придется вернуться и начать с 17 века. История оптики довольно подробно описана в книжках по самой оптике, поэтому много чего вы знаете. Оптика, активно развиваясь в 17 веке, все же не давала таких впечатляющих результатов, как механика Ньютона.

В начале 17 века целый раздел оптики – геометрическая оптика – был, в целом, теоретически замкнут. Был открыт закон преломления света. Поэтому для кусочно-однородных сред было понятно, как строить геометрическую оптику. Отметим развитие и других разделов.

Как вам должно быть хорошо известно, в оптике возникают 2 подхода к интерпретации природы света – корпускулярный (ньютоновский) подход и волновой подход. В 17 веке много чего конкретного было открыто. Например, Ньютон открыл природу монохроматического света, исследовал явление дисперсии и интерференции.

Но я хотел обратить ваше внимание на следующие моменты. Во-первых, корпускулярные идеи позволили Ньютону количественно привязаться к

монохроматичности и свету. Вы знаете, что в корпускулярном подходе скорость световых частиц однозначно связана с цветом. То есть, у частиц должна быть какая-то скорость.

Когда мы говорим о волновой оптике 17 века, о точках зрения Гюйгенса и Гука, то иногда мы невольно на место волновой оптики ставим современные представления. Например, мы себе представляем гармонические синусоидальные волны, проводим аналогию со звуком или волнами на поверхности воды. В то время как волновая оптика Гюйгенса и Гука не дает нормального объяснения явлению цвета. Их волны, так сказать, «бесцветны».

Концепции Гюйгенса были очень существенны, они позволяли объяснять многие явления (например, явление двулучепреломления в кристалле исландского шпата). При этом, если вы посмотрите на труды Гюйгенса, то увидите, что волны там представляют собой колебания эфира. Причем эти колебания похожи, скорее, на современные солитоны и представляют собой всплески, распространяющиеся в пространстве. У них нет тех свойств, которыми обладают гармонические, монохроматические волны. Поэтому цвет нормально объяснить не удавалось. Эта была одна из причин, по которой волновая оптика не очень удачно конкурировала с корпускулярной теорией.

С другой стороны, понятие о конечности скорости света являлось качественным понятием, которое возникло далеко не сразу. В трудах Декарта по оптике мы увидим рассуждения на тему того, что свет – это колебания эфира. Иногда проскальзывает аналогия с распространением каких-то частиц. Но при этом, понятие скорости света у него нигде не возникает.

Открытие конечности скорости света в астрономических наблюдениях

Именно поэтому очень важным (с качественной точки зрения) было открытие датского астронома Олафа Ремёра. Он в 1675 году продемонстрировал доказательство конечности скорости света на наблюдениях спутников Юпитера. Он даже получил само значение скорости света.

Часто в учебниках, во время обсуждения конечности скорости света, вспоминают наблюдения влияния движения источника света на оптические явления, под чем, конечно же, подразумевается абберация света звезд. Надо сказать, что наблюдения Джемса Бредли по абберации света звезд, проведенные в 1728 году, были еще одним способом подтверждения факта конечности скорости света и измерения этой скорости. Объяснения результатов этих наблюдений базировались на корпускулярной концепции.

Значения скоростей света, полученных Ремером и Бредли, совпадали с современной константой только в первом знаке. В последующих знаках уже имелась большая ошибка.

На самом деле, только в 1849-1850 годах были проведены знаменитые эксперименты двух различных исследователей, Физо и Фуко, по измерению скорости света. В этих экспериментах использовались зеркала с шестеренками. Таким образом, впервые удалось измерить скорость света в земных условиях. Точность измерения существенно повысилась, правильно получились уже 4 знака после запятой.

Влияние движения источника света на оптические явления

В 18 веке понемногу утверждается концепция Ньютона. Конечно, возникали некоторые вопросы, на которые пытались ответить. Например, у Ньютона, по идее, скорость света должна быть разная для разных цветов. И было интересно исследовать влияние скорости источника света на скорость частиц. Согласно закону сложения скоростей, такое влияние должно иметь место.

В то время, конечно, уже знали максимальную скорость движения Земли по орбите – 30 км/с. И для наблюдения какого-нибудь эффекта надо было уметь измерять скорость света с точностью до 4 знака, что было тяжело.

Измерение интенсивности света. Фотометрия

Далее, стоит обсудить два существенных момента, произошедших в 18 веке. Во-первых, и во времена Ньютона, и после него не умели количественно измерять интенсивность света. Такая ситуация сохранялась вплоть до середины 18 века, когда были проведены серьезные исследования по фотометрии. Их проводили (в разных странах) француз Пьер Буге и немец Иоганн Ламберт (1750-1760). Они справились с проблемой измерения интенсивности света. В принципе, несложно догадаться, как это у них получилось.

Человеческий глаз умеет отлично различать относительную яркость объектов. Если между двумя полями разной яркости имеется резкая граница, то различить это не сложно. Изменяя яркость одного из полей (например, вводя серый клин), можно яркость проградуйровать, ориентируясь на момент, когда глаз перестает различать границу смены яркости. Таким образом, человеческий глаз является идеальным прибором для относительного измерения яркости. Но абсолютное значение определяется глазом плохо (из-за изменения диаметра зрачка).

Идеи Эйлера о природе цвета

Продолжим дальше. Существенное влияние на исследования природы света оказал Леонард Эйлер. В его «Письмах к немецкой принцессе» он впервые высказал идею о гармоничности цветов. К тому времени уже было известно, что чистый звук определенной высоты соответствовал отдельной гармонической синусоиде. Таким образом, Эйлер обобщил эту идею и на монохроматичные цвета. Стоит отметить, что без этой идеи не смогла бы возникнуть новая волновая оптика, принципиальным отличием которой была идея синусоидальной гармонической волны, длина которой связана с цветом.

Интерференция волн Томаса Юнга, объяснение колец Ньютона и опыт Юнга в 1800 году

Окончательное развитие такой новой волновой оптики началось с экспериментов Томаса Юнга, замечательного английского исследователя (начало 19 века). Подчеркнем основные моменты. Во-первых, Юнг проводил аналогию с волнами на воде. В то же время, известно, что световые волны у Юнга были продольными. Соответственно, он вводил идею об упругом эфире, колебания в котором и представляют собой свет.

Существенным здесь является то, что никакой теории упругости в то время не было. Да, были какие-то зачаточные задачи, которые удавалось решать некоторым продвинутым исследователям. Например, в 1780 годах Кулон использовал в своих экспериментах крутильные весы. Для объяснения крутильных деформаций он ввел модуль поперечного сдвига. А поскольку у Юнга волны были продольными, то за деформацию у него отвечает модуль продольного сжатия, или модуль Юнга (разумеется, фамилия Юнга к этому модулю прикрепилась лишь позднее). Далее, Юнг записал формулу, связывающую скорость распространения продольных волн в среде с конкретным модулем сжатия:

$$c = \sqrt{E/\rho}$$

Таким образом, Юнгу пришлось параллельно с развитием теории упругого эфира развивать теорию упругости. Конечно, никаких дифференциальных уравнений в частных производных он не записывал, так что развить удалось только зачаток.

С помощью своей теории Юнг объяснял результаты как своих экспериментов (опыт Юнга, нечто среднее между дифракцией и интерференцией), так и других (например, кольца Ньютона). Также он смог количественно получить значение длины волны.

Обсудим еще один интересный момент. Часто с Юнгом связывают интерференцию, простейшие схемы интерференции, принцип суперпозиции и так далее. Но на самом деле Юнг разобрал и дифракцию. Более того, его теория дифракции ничуть не хуже теории дифракции Френеля, которой вы сейчас пользуетесь, формулируя принцип Гюйгенса-Френеля. Метод Френеля получил большее распространение за счет, во-первых, серьезного авторитета Френеля по сравнению с Юнгом, а во-вторых, за счет того, что метод Юнга был немного менее удобен. Ведь вы должны понимать, что решение задачи дифракции представляет собой приближенное решение волнового уравнения. И таких приближенных методов, использующих асимптотические ряды, может быть несколько.

Открытие поляризации при отражении света (1807)

Стоит отметить, что резкого перехода на новую волновую теорию не произошло. Позиции корпускулярной оптики пока еще были слишком сильны. И тут произошло еще одно очень важное событие – открытие поляризации света (1807).

Значимость этого открытия заключается в следующем. Еще в 17 веке было известно явление двулучепреломления, но в то время его связали именно со свойствами исландского шпата. А в 1807 году оказалось, что симметрия в свойствах света возникает не в каком-то особенном материале, вроде исландского шпата, а в результате такого обыденного явления, как отражение от плоской поверхности.

Вы знаете, что для наблюдения такого явления нужна не только плоская отражательная поверхность, но и оптический прибор – анализатор. В процессе эксперимента стало ясно, что явление двулучепреломления то пропадает, то появляется, в зависимости от отражения света от стекла или воды. Это было удивительно.

Лаплас, замечательный математик и физик, понял, что у света есть «стороны», какая-то асимметрия. И он сделал вывод, что такой эффект проще объяснить с позиции корпускул, чем с позиции продольных волн. Продольные волны вообще симметричны в поперечном направлении, у них нет никакого выделенного направления.

Оптика Френеля

Далее, в дальнейшем развитии оптики принимает участие Френель. Он начал с замечательных успехов в дифракции. Его метод не только оказался более удобен, чем метод Юнга, но еще и помог решить целый ряд конкретных задач. Вы знаете о его дискуссии с Пуассоном, которые привели к открытию пятна Пуассона.

Хочу отметить, что в случае с простой интерференцией и дифракцией неполяризованного света не имеет значения продольность или поперечность световых волн, результат получается одинаковый. Но, когда возникла необходимость объяснить результаты опытов с поляризацией, то и Юнг, и Френель выразили идеи о том, как можно связать волновую концепцию света с поляризацией. Они предложили использовать поперечные волны. К тому времени все еще нормальной теории упругости не было, и сказать, что и как поперечно колеблется при распространении волн, нельзя было.

Поэтому Френель пишет две серии работ. Во-первых, нужно было объяснить явления, открытые Малюсом и Брюстером, связанные с поляризацией при отражении света от плоской поверхности. Френель публикует работу на эту тему в 1823 году. Во-вторых, так как детектором поляризации был кристалл исландского шпата, то нужно было создавать базовую кристаллооптику. Эти работы Френель публикует в 1826-1827 году.

Отметим сходство и различие этих работ. Сходство заключается в том, что по-прежнему нет никакой теории упругих колебаний сплошной среды. Более того, когда мы говорим о внешней стимуляции появлений новых разделов физики, то часто возникает разговор о практической значимости. А теория упругости может найти свое применение во многих прикладных задачах – от деформации отдельной балки до устойчивости целых зданий.

Мы, кстати, получаем любопытный факт – теория, которая чаще всего используется в прикладных задачах, которую активно изучают студенты технических вузов, возникла на базе совершенно абстрактных фундаментальных физических задач. Стимулом к созданию математической теории упругости было развитие физики упругого эфира.

Было понятно, что идея жидкого упругого эфира, вроде жидкости или газа, не годилась по той причине, что в жидкостях и газах поперечные волны не распространяются. Работы Френеля являются ярким показателем. Там не было систем дифференциальных уравнений, но были базовые идеи о том, что световая волна синусоидальная, монохроматическая, падает на границу раздела двух сред, и при этом есть определенные граничные условия (без дифференциальных уравнений).

Дается довольно четкая интерпретация волновым колебаниям – они представляют собой сдвиг упругого эфира. Тот вектор в волне, который мы сейчас называем вектором электрического смещения, по представлениям того времени отвечал смещению эфира в поперечном направлении.

Забегаая вперед, я хотел сказать следующее. У Френеля нормальные компоненты световой волны имеют разрыв, что придает граничным условиям некую «странность». Но это было бы плохо для реальной простой упругой среды, которую можно наблюдать в эксперименте. Для такой среды все нормальные компоненты должны быть непрерывны. А у Френеля они получились разрывны. Почему так получилось? Видимо, оптическая интуиция подсказала Френелю, что по-другому нельзя. Но его за это ожидаемо критиковали.

Таким образом, у Френеля получались его знаменитые формулы, связывающие нормальные и тангенциальные компоненты падающей, отраженной и преломленной световой волны.

Обратите внимание на еще одну особенность. В принципе, если вы посмотрите на теорию кристаллооптики у Лансберга, то заметите, что в учебнике материал изложен так же, как и у Френеля. Даже почти ничего менять не пришлось, только вектор электрического смещения \vec{D} заменил собой вектор смещения эфира.

Но в случае кристаллической среды на границе раздела двух сред меняется модуль сдвига, а плотность одинакова. В обычных же задачах наоборот, плотность меняется, упругость остается неизменной. Такие моменты оставляли после вопросы, к которым можно было придраться. Тут остается отдать должное интуиции Френеля. Потому что как его современники, так и мы, читая его труды, не способны понять, почему Френель сделал именно так. Отсутствие последовательной теории упругости давало Френелю некую свободу в действиях, чем он и пользовался на свое усмотрение.

Нам осталось обсудить еще один замечательный результат. Он был связан с тем, что Френель в своих работах предсказал эффект, который потом был получен намного позже – частичное увлечение эфира движущейся средой. Он получил формулу для скорости света в движущейся среде:

$$\bar{c}_1 = c_1 + (1 - 1/n^2)u$$

Формирование математической теории упругости и оптика Френеля

Как мы уже выяснили, под влиянием волновой оптики, параллельно закладывается база таких важных разделов классической механики, как теория сплошной среды, гидродинамика и теория упругости. Стоит отметить, что такому развитию также способствовало появление теории дифференциальных уравнений в частных производных.

В 1827 году Навье получил уравнение для смещения:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{e}}{\partial t^2} = 3n \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{e} - n \operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{e}$$

Затем, в 1828 году, немного другое уравнение получил Коши в рамках теории упругости в изотропной среде:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{e}}{\partial t^2} = (k + 4n/3) \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{e} - n \operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{e}$$

Также вы прекрасно знаете уравнение Навье-Стокса, полученное примерно в ту же эпоху, которое описывает течение вязкой жидкости.

Обратите внимание на то, что этот период отличался своеобразными требованиями к физической теории. Нужно было не только использовать адекватный, внутренне непротиворечивый математический аппарат, но еще добиться того, чтобы механизм действия такой математической конструкции был понятен и прозрачен. Те операторы градиента, ротора и дивергенции, которые вы видите в уравнениях Навье и Коши, являются лишь условными записями, сокращением. В первой половине 19 века такие дифференциальные операторы еще не вводились. Использовались лишь частные производные. И, как вы понимаете, получаемые формулы были очень громоздкими.

Как только эти уравнения получили, то они сразу же стали объектами исследования. И оказалось, что их решение действительно имеет волновую форму. Однако в случае реалистичной модели упругой изотропной среды возникала проблема. В такой среде обязательно должны распространяться как продольные волны, так и поперечные.

$$c_{\parallel} = \sqrt{\frac{k + \frac{4n}{3}}{\rho}}; \quad c_{\perp} = \sqrt{\frac{n}{\rho}}$$

Было непонятно, куда девать продольную волну. Современный исследователь, скорее всего, постарался бы построить такую конструкцию, в которой выражение $k + 4n/3$ было равно нулю. Тогда в волновом уравнении осталось бы слагаемое с ротором, и в решении остались бы только поперечные волны. Но в те времена так делать было нельзя. Нужна была понятная конструкция, которая объясняла бы свойства эфира. И, получив волновое уравнение с одним ротором, пришлось бы объяснять, что это за эфир такой, в котором распространение смещение описывается именно таким уравнением.

В 1837 году такой эфир придумал Мак Куллах. У него была довольно своеобразная конструкция, представляющая собой систему гироскопов. То есть, его среда состояла из множества гироскопов, закрепленных на шарнирах. Такая среда не

сопротивляется перемещению гироскопов, но сопротивляется их повороту. В итоге такая экзотическая конструкция среды позволяла существовать только поперечным волнам.

Альтернатива Френеля

Обсудим еще одну проблему. В то время все стремились построить последовательную модель сплошной среды, используя дифференциальные уравнения. Одним из математиков-физиков, который занимался этой проблемой, был Грин. Вспомните, мы обсуждали «странность» граничных условий Френеля, состоящую в разрыве нормальной компоненты смещения упругой среды. Так вот, в 1837 году Грин предложил принять естественные граничные условия. При этом у него получалась теория, сильно отличающаяся от теории Френеля. И примечательно здесь то, что противоречащие эксперименту результаты получились именно в той области работы, в которой Грин отошел от условий Френеля.

Таким образом, сформировались две альтернативы. С одной стороны была «реалистичная» теория сплошной среды, которая противоречила эксперименту. А с другой – «странная» теория Френеля, успешно подтвержденная на опытах. На этом моменте мы сделаем паузу и сменим тему.

Лекция 7. Концепция электромагнитного поля Фарадея-Максвелла

План лекции:

Исследования Майкла Фарадея в 30-50х годах 19 века:

- Продолжение ломки перегородок между разделами физики.
- Возрождение идей Декарта.

Предпосылки и фон:

- Идеи близкодействия.
- Развитие аппарата дифференциальных уравнений в частных производных. Теория континуума.
- Теория потенциала Пуассона. Использование потенциалов φ и A .

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \varphi; \quad \mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A};$$
$$\mathbf{A} = \int \frac{1}{c} \mathbf{v} \frac{dq}{r}; \quad \varphi = \int \frac{dq}{r}$$

Майкл Фарадей (1791-1867):

- Экспериментальное доказательство единства всех видов электричества (статического, гальванического, термо-, химического, пьезо-, индукционного).
- Влияние среды на взаимодействие (ϵ , μ , диамагнетизм).
- Открытие закона электромагнитной индукции (1831) – *магнетизм порождает электричество*.

$$\mathbf{A} \dots \Rightarrow \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$

– вектор электрического состояния пространства

- ЭДС индукции возникает и без проводника (измененное состояние пространства).
- Исследования Фарадея по химическому действию тока (электролиз):
 - Тождество эфира и обычной материи – диэлектрика.
- Роль среды в электростатике. Идея силовых линий электрического поля, как физических линий сил.
- Открытие диамагнетизма (отталкивание стекла в противовес парамагнетизму).
Модель диэлектриков Фарадея укладывалась в теорию Вебера; аналогия между эфиром и обычной материей – произвольная гипотеза.
- Открытие вращения плоскости поляризации в магнитном поле (эффект Фарадея). Идеи единства оптических и электромагнитных явлений.

Джеймс Клерк Максвелл (1831-1879)

- Математизация идей Фарадея на основе оптики и математических (механических) моделях упругой среды – эфира – дифференциальных уравнениях в частных производных.

1855-1856 – «О Фарадеевых силовых линиях». Гидродинамическая модель.

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi\rho; \quad \operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j};$$

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}; \quad \mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A};$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = \frac{\partial}{\partial t} \oint \mathbf{A} d\mathbf{l},$$

где \mathbf{A} – вектор электротонического состояния.

1861-1862 – «О физических силовых линиях»:

- Механическая модель среды

$$\mathbf{j} = \lambda \mathbf{E}; \quad \mathbf{j}_{\text{смещ}} = k \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\varepsilon, \mu, \lambda \Rightarrow$$

\Rightarrow эмпирические коэффициенты, для свойств среды

- Ток проводимости и смещения.
- Пока нет волнового уравнения и подробного анализа. Лишь утверждается, что в такой среде есть волны, распространяющиеся со скоростью c .

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \Rightarrow$$

\Rightarrow скорость света проникает в теорию электричества

Отличие от «обычной» гидродинамики – принцип суперпозиции и «продольная стационарность». Вихри, разделенные «шариками». Сила, действующая на шарики – электрическое поле, движение шариков – ток. В диэлектриках и в вакууме шарики лишь смещаются.

- Преобразование полей при движении.

1864 – «Динамическая теория электромагнитного поля»:

- Нет моделей
- Эфир – «часть пространства, которая окружает тела, находящиеся в электрическом и магнитном состоянии» - электромагнитное поле
- Поперечные электромагнитные волны со скоростью:

$$v = c_0 / \sqrt{\varepsilon\mu}$$

- Эфир – особый случай диэлектрика

$$\begin{cases} j_{\text{полный}} = j + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial D}{\partial t}; & \text{rot } H = \frac{4\pi}{c} j_{\text{полн}}; \\ B = \text{rot } A; & E = - \left[B \times \frac{v}{c} \right] - \nabla \varphi - \frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t}; \\ D = \varepsilon E; & \text{div } D = 4\pi \rho; & \text{div } j + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0; \end{cases}$$

Экспериментальное объяснение теории Максвелла

Измерение диэлектрической проницаемости:

- 1872-1874 – Больцман
- 1875 – Зилов (Россия), для жидкостей
- 1875 – Керр открыл двойное лучепреломление в электрическом поле

Отношение научного сообщества к теории Максвелла:

- В Германии теория Максвелла осталась практически незамеченной. В Англии – наоборот, целый ряд ученых принял теорию без особых колебаний.

Теория Гельмгольца и эксперименты Герца:

- Гельмгольц инициировал интерес Герца к выбору из двух электродинамик:
 - 1888-1889 – знаменитые эксперименты Герца.
 - 1888 – открытие Герцем стоячих электромагнитных волн. Наблюдение волновых эффектов. Длина волны ~ 0.5 метра.

Петр Николаевич Лебедев (1866-1912):

- В лаборатории МГУ повторил опыты Герца, но с длиной волны ~ 6 мм. Частота волны у Лебедева получилась в 100 раз больше, чем у Герца.
- Исследовал двойное лучепреломление в анизотропных средах
- 1900 – опыты по давлению света
- 1901 – давление света на газы

Последующее развитие теории:

- В Англии авторитет Максвелла был настолько высок, что его теорию даже не пытались проверять. Зато сама теория активно развивалась (еще до опытов Герца)
- 1885-1888 – Хэвисайд записал уравнения Максвелла в практически современном виде.
- 1884 – Пойнтинг описал распространение энергии электромагнитного излучения.
- 1881 – Дж.Дж.Томсон, расчет энергии заряженного шара, движущегося со скоростью v , на основе уравнений Максвелла в младшем порядке по v/c
- 1889 – теория вибратора Герца
- Дж.Дж. Томсон, Пуанкаре, Абрагам – идеология импульса электромагнитного поля:

$$\mathbf{g} = \frac{\mathbf{P}}{c^2}, \text{ где } \mathbf{P} \text{ – вектор Пойтинга}$$

- 1898 – Садовский (Россия) предсказал *момент импульса электромагнитного поля* (для эллиптически поляризованного света)

Посвятим сегодняшнюю лекцию концепции электромагнитного поля Фарадея-Максвелла.

Исследования Майкла Фарадея в 30-50х годах 19 века

Предпосылки и фон

Мы с вами уже обсуждали характерную особенность этой эпохи, заключающуюся в возрождении идей Декарта и ломки перегородок между разделами физики.

В прошлый раз мы говорили о развитии электричества и магнетизма. Очень многие идеи того периода имели в базе часть картезианских взглядов, например, объяснение явлений через движение зарядов. Но идея близкодействия, сама по себе, задействована не была. И теперь она возникает у Майкла Фарадея, который является отцом-основателем концепции электромагнитного поля.

Другой предпосылкой к созданию обсуждаемой концепции было развитие аппарата дифференциальных уравнений в частных производных. В конце 18 – начале 19 века активно развивалась теория потенциала, с которой связаны фамилии Пуассона, Лапласа и других математиков. Для этих потенциалов можно записать уравнения в частных производных – уравнения Пуассона, Лапласа, которые тогда успешно решались. Метод потенциала оказался очень эффективным.

Надо отметить, что независимо от концепции электромагнитного поля Фарадея-Максвелла, метод потенциала развивается и в электродинамике. В электродинамике есть известный подход, основанный на потенциалах. В частности, немецкий ученый Рудольф Клаузиус (отец-основатель термодинамики) занимался теорией диэлектриков и другими электромагнитными явлениями. При этом он как раз вводил векторный и скалярный потенциал, использовал уравнения в частных производных. По сути, это был еще один подход к единой электродинамике, основанный на тех же базовых законах, что и, например, электродинамика Гаусса-Вебера.

Майкл Фарадей (1791-1867)

Майкл Фарадей активно проводил свои физические исследования в двадцатых-пятидесятых годах 19 века. Многие его открытия вам хорошо известны. Но нам надо обсудить его достижения обобщенно.

Фарадей не имел стандартного для той эпохи университетского образования. Тем не менее, он был включен в физическую среду того времени. Известно, что он был лаборантом у Хемфри Деви, которого мы уже упоминали. Чем же прославился Фарадей в рамках самостоятельной деятельности?

В первую очередь, он экспериментально доказал единство всех видов электричества. Так получилось, что к началу 19 века видов электричества оказалось очень много. Если в 17-18 веке было только электричество от трения, то потом возникла масса разных видов, некоторые из которых мы уже упоминали (например, гальваническое электричество, термоэлектричество). Я не буду детально вдаваться в подробности. В принципе, базовые труды Фарадея по электричеству переведены на русский язык, и вы легко можете с ними ознакомиться. Основная заслуга Фарадея, которую признало все научное сообщество, заключается в доказательстве того, что за всеми различными явлениями стоит единая природа.

Далее идет открытие явления электромагнитной индукции, которое мы уже упоминали. Здесь важно следующее. Именно в обобщающих рассуждениях по поводу электромагнитной индукции Фарадей начинает высказывать определенные предположения о том, как все это устроено, причем его конструкции в значительной степени носили качественный характер (Фарадей вообще не писал каких-то сложных математических соотношений). Образы Фарадея, которые он использовал для объяснения своих явлений, были скорее графическими, чем математическими. Именно Фарадей впервые в электричестве ввел силовые линии (в магнетизме они уже были).

У Фарадея графические образы заменяли математически формулы. И эта замена, надо отметить, была весьма последовательной. Именно это позволило Джеймсу Максвеллу записать все соотношения на адекватном математическом языке.

Если говорить обобщенно, то главной идеей была картезианская мысль о близкодействии. В электричестве и магнетизме нет никаких воздействий, которые мгновенно передаются на бесконечно большие расстояния. Эта воздействие передается от точки к точке через эфир, который заполняет все пространство.

Для объяснения явления электромагнитной индукции Фарадей вводил понятие «изменение электротонического состояния пространства». Для описания этого изменения вводился вектор A , который мы сегодня называем векторным потенциалом. Происходила деформация пространства вокруг, например, электрического тока, которой соответствовало возникновение некоего напряжения. По словам Фарадея, если это состояние меняется, то будет иметь место электрическое действие. Мы можем формально записать следующее уравнение (которое Фарадей, конечно же, не писал):

$$\mathbf{A} \dots \Rightarrow \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$

Такая запись впервые была сделана Максвеллом, который таким образом интерпретировал слова Фарадея.

Важно, что индукционные явления возникают без проводника, который является лишь индикатором этого возникновения. Таким образом, постепенно формируется образ поля как некоего изменения состояния пространства вокруг зарядов и токов.

Упомянем другие направления экспериментальных исследований Фарадея.

Начнем с исследованием по электролизу. Здесь надо иметь в виду, что исследования в области химических процессов, происходящих в жидких проводниках, производились еще в начале 19 века (тот же Хемфри Деви занимался этим). Но тогда не было меры электрических явлений. Сила тока возникает только после работы Ома (двадцатые годы), в которой были сформулированы базовые понятия. И только в тридцатые годы были проведены знаменитые работы Фарадея по электролизу, которые даже входят в программу современной средней школы.

Закон Фарадея для электролиза, который нам кажется довольно простым, для той эпохи был очень важным открытием. Оно касалось не просто явления электролиза, но и вообще природы электричества. Тогда уже смогли измерить силу тока и обнаружить, что возникающие химические изменения пропорциональны протекшему току.

Далее, Фарадей занимался влиянием среды на магнитные и электрические явления. Обратите внимание, что в рамках ньютоновской механики, среда на гравитацию вообще никак не влияла. С позиций теории Ньютона, на силу гравитации влияли лишь массы двух гравитирующих точек и гравитационная постоянная. В электромагнетизме ситуация другая. Даже в школе в формуле для закона Кулона используется такое понятие, как диэлектрическая проницаемость среды. Хотя сам Кулон подобных понятий не вводил. Таким образом, идея влияния среды на электростатическое взаимодействие является чисто фарадеевской идеей. Впервые она возникает в тридцатых годах 19 века, когда Фарадей как раз и проводил исследования влияния среды на электрические явления.

Кроме того, эти идеи сопровождалась образами силовых линий. Причем у Фарадея эти образы были не геометрическими, а физическими. Он считал силовые линиями такими конструкциями, которые имеют реальное место в природе.

Что касается объяснения свойств диэлектриков, то для этого было необязательно радикально изменять какие-то подходы. С помощью классических методов

электродинамики дальнего действия в то время можно было объяснить, например, поляризацию диэлектриков.

Но тут был еще один момент, который был характерен как для Фарадея, так и для Максвелла. В каком-то смысле, Фарадей и Максвелл отождествляли эфир и пустое пространство. А пространство, в свою очередь, может быть заполнено диэлектриком или магнитным материалом. И с точки зрения Фарадея, идейно эти два случая представляли собой одно и то же. То есть, как пространство, заполненное диэлектриком, так и пустое пространство суть одно и то же. Одно и то же в том смысле, что количественные отличия есть. Но качественно модификация эфира (пустого пространства) и модификация заполненного пространства друг от друга не отличались. И на этот существенный момент многие не обращают внимания. А он, кстати, очень сильно влияет на понимание того, что сделал конкретно Максвелл.

Далее, уже где-то в пятидесятые годы Фарадей пришел к однозначному выводу о том, что свет является электромагнитным явлением. Природа света является чисто электромагнитной. Фарадей не смог доказать то в явном виде, но нашел косвенные явления, указывающие на наличие этой связи. Я имею в виду явление, известное вам как эффект Фарадея. Напомню, что этот эффект состоит в явлении вращения плоскости поляризации света в магнитном поле. Стоит отметить, что этот эффект не указывает напрямую на электромагнитную природу света, но является серьезным аргументом в пользу мыслей на этот счет.

Джемс Клерк Максвелл (1831-1879)

Ситуация с Максвеллом не такая простая, но некоторые моменты мы обсудим, чтобы они остались у вас в голове. Кстати, как вы знаете, что Максвелл создал фундаментальные теории, как в электродинамике, так и в статистической физике. К сожалению, труды по статистической физике до сих пор не переведены на русский язык.

«О Фарадеевых силовых линиях»

Одним из первых направлений деятельности молодого Максвелла было написание серии статей, которые потом объединили в название «О Фарадеевых силовых линиях». Что в них было? Во-первых, Максвелл вдохновился идеями Фарадея в области электромагнетизма и захотел сделать то, что сам Фарадей был не в состоянии сделать - записать эти идеи адекватно с точки зрения математики, с использованием самого современного для той эпохи математического аппарата.

Для нас важно, что недавно созданный математический аппарат (с уравнениями в частных производных) был еще довольно пластичен. Сейчас, когда мы говорим о гидродинамике и теории упругости, у нас сразу в голове возникают уравнение Навье-Стокса и Коши. На самом деле, в то время не было еще таких обязательств, но была определенная свобода.

Вот, например, мы используем символ дивергенции. Понятно, что при течении несжимаемой жидкости, то простейшее течение может быть связано с наличием источников и стоков жидкости, которые определяются как раз с помощью оператора дивергенции. В своей серии трудов Максвелл как раз использует такую модель. Но она у него пока является половинчатой. Он использует ее только для электростатики, но не применяет в магнетизме. Для магнетизма он чаще использовал рассуждения с аналогиями. Так, следующее уравнение было довольно понятно:

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi\rho$$

Заряды рассматриваются как источники некоей жидкости, флюида, эфира. Положительные заряды при этом являются источниками, а отрицательные – стоками. Но тогда, чтобы создать конструкцию вроде электростатики, Максвеллу надо было сделать стационарный поток. При этом не так важно, чем является вектор \mathbf{D} – смещением или скоростью потока. Чтобы добиться стационарности, Максвеллу пришлось добавить диссипацию (стационарный поток несжимаемой жидкости с трением). В то время не было характерным использование каких-либо законов сохранения, поэтому модели с добавленной диссипацией имели чисто формальный характер.

Что касается магнетизма, то использовались рассуждения по аналогии. Как вы помните, во вполне сформированной к тому времени электродинамике дальнего действия были уже какие-то формулы. Для их объяснения использовалось прямое межчастичное взаимодействие. В принципе, как в электростатике писали уравнение Пуассона вместо закона Кулона, так и в магнетизме можно было записать уравнение Био-Савара, используя уравнения в частных производных:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$$

Также появился закон электромагнитной индукции и запись для магнитного поля в форме:

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}; \quad \mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A};$$

Такие соотношения, в принципе, задавали электродинамику, записанную через частные производные. Но результаты почти ничем не отличались от предсказаний теории Вебера. Поэтому эти уравнения были пока одной из трех форм записи электродинамики (Вебер, Максвелл, Клаузиус).

Далее, в серии работ Максвелла было математически описано, что собой представляют силовые линии и поле, которые вводил Фарадей. Но каких-либо принципиально новых результатов не было.

«О физических силовых линиях»:

Ситуация изменилась в начале шестидесятых годов. В 61-62 годах Максвелл публикует «О физических силовых линиях». Это его вторая серия работ. Здесь появляются новые вещи. Но давайте поговорим не о том, какие выводы делает Максвелл (их вы во многом знаете), а о том, чем они отличаются от современных представлений.

Самое главное свое достижение, которое Максвелл видел в этих трудах, заключается в создании единой квазимеханической конструкции упругой среды. Эта среда была достаточно странная с точки зрения механических свойств. Но, так как в ту эпоху математические описания упругой среды только устанавливались, то эти механические свойства Максвелл обсуждает сначала чисто математически, и лишь потом пытается на пальцах объяснить, как такая среда может соответствовать представлениям об упругих или жидких средах.

Когда мы говорим о силовых линиях магнитного поля, то мы вводим два вектора. Вектор магнитной напряженности \mathbf{H} и вектор магнитной индукции \mathbf{B} . Так вот, Максвелл считает, что вектор \mathbf{H} является вектором угловой скорости среды. Причем в этой среде может иметь место как потенциальное течение жидкости, так и вихревое.

Кстати, активно развивавшаяся в этот период гидродинамика позволила понять то, как математически описать вихри, о которых говорил еще Декарт. Появляется тот образ, который мы сейчас называем оператором ротора. Само обозначение, кстати, появляется намного позже. Как в гидродинамике, так и у Максвелла, используются только частные производные.

Итак, что же Максвелл придумал в механической модели среды? Он считает, что в этой среде имеет место баланс – выравнивание давления. Но при этом, оказывается, что если мы рассматриваем направление линий магнитной напряженности, то упомянутое давление будет разным вдоль линии и поперек. Эти линии как бы натягиваются и не дают друг на друга, пытаясь натянуть и сжать среду в направлении

линии. А поперек – наоборот, возникает магнитное давление. Вот такой вот метод, который использовался для выстраивания уравнений.

Обратите внимание, что законов сохранения в то время еще и в помине нет. Да и с давлением все не до конца понятно. Обычно при разговорах о балансе давлений вспоминается уравнение Бернулли. Но это уравнение получалось в стационарном случае. В то время как у Максвелла баланс давлений соблюдался и во временных процессах. Такое противоречие имело место.

В общем, стоит внимательно посмотреть на то, как выстраивается система электродинамики. Это происходит не так, как мы себе сегодня представляем.

Пойдем дальше и обсудим следующую проблему. При рассмотрении обычной, реальной гидродинамики стоит иметь в виду, что эта наука до сих пор развита не очень хорошо. Например, мы знаем, что невозможно предсказать погоду на длительный срок. В гидродинамике всегда возникают особые точки, связанные, в частности, с тангенциальными разрывами, которые возникают в течении жидкости. Если мы рассмотрим идеальную жидкость, в которой нет тангенциальных сил, то в ней такие разрывы неизбежны. Но при рассмотрении вязкой жидкости с малым коэффициентом вязкости, то оказывается, что при параллельном распространении двух слоев жидкости с разными скоростями жидкость будет неустойчивой – неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. Поэтому течение слабовязкой жидкости – довольно неприятная задача с математической точки зрения.

Получается, что в теории Максвелла, с одной стороны, имеется течение жидкости, а с другой стороны имеется принцип суперпозиции. Представим себе два вихря. Если они крутятся в одну сторону, то соприкасающиеся части этих вихрей имеют скорости, направленные в разные стороны. В итоге скорость в этих местах может оказаться равной нулю, что на деле неверно. Таким образом, в реальной гидродинамике принцип суперпозиции не работает. Но имеется разрыв тангенциальной компоненты, неустойчивость, турбулентность и прочие радости жизни.

У Максвелла, за счет принципа суперпозиции, можно из множества вихрей сделать один, большой, который будет огибать все остальные. Такое несоответствие с гидродинамикой было большой проблемой для Максвелла, которую он попытался обойти. В учебнике Бориса Ивановича Спасского по истории физики вы найдете, что этот момент поставлен на первый план. Там сказано, что Максвелл построил механическую модель, составленную из больших вихрей, а между ними проложены маленькие шарики. Эти шарики играют роль «шестеренок», которые согласуют движение больших вихрей на местах их стыков. Стоит отметить, что эта проблема не

стоит у Максвелла на первом месте. Это было лишь противоречие, которое надо было как-то снять.

Получается, что в результате записи баланса давлений у Максвелла возникает идея создания единой модели среды, модифицированного движения эфира, которая позволила записать систему уравнений. Но, по сравнению с современной трактовкой уравнений Максвелла, имеется одна принципиальная особенность. В эту систему на равных правах входит то уравнение, которое сейчас мы относим к второстепенным уравнениям.

Сейчас мы пишем систему уравнений для 4 векторов - E, B, H, D . При этом, как известно, возникают материальные уравнения. Современная трактовка вполне допускает нелинейную связь этих векторов. Конкретный вид этой связи определяется свойствами среды. А у Максвелла, в шестидесятые годы, таких идей не было. У него был стандартный вид материальных уравнений, который мы пишем в самом базовом варианте, включающий коэффициенты ϵ, μ, λ . Эти уравнения были внедрены в систему уравнений на равных правах. Причем интерпретация среды была основана на этих уравнениях.

Далее, дифференциальный закон Ома тоже был внесен в базовую конструкцию. А сегодня мы знаем массу примеров сред, в которых закон Ома не выполняется. И если мы говорим об энергии (а ведь у Максвелла уже появились волны), то в системах, где выполняется дифференциальный закон Ома, энергия может только рассеиваться. И электромагнитные волны могут либо распространяться, либо поглощаться. Но ни в коем случае не создаваться. Этот вопрос Максвелл не обсуждает совсем.

Впервые возникает преобразование полей при движении наблюдателя и системы отсчета. Это следует из объяснения закона электромагнитной индукции. Ведь она может рассматриваться как, например, изменение магнитного поля за счет изменения тока в контуре. А может за счет того, что мы перемещаем магнит. Причем перемещение может возникать и за счет движения системы отсчета. И Максвеллу удалось вывести формулу (разумеется, нерелятивистскую), которая это преобразование полей описывает.

Далее, несмотря на то, что во второй серии работ еще нет волнового уравнения, все равно присутствует демонстрация того, что решение в виде волны может быть получено. И даже выведена формула для скорости этой волны:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

Обратите внимание на то, что этот результат был опубликован уже после опытов Вебера и Кольрауша, в которых эту электромагнитную константу определили.

Кстати, именно за счет непонятной роли закона Ома оставалось туманной сама природа тока. Сейчас мы говорим, что ток есть движение зарядов. Что-то похожее было у Вебера, а у Максвелла – нет. Соединение идей Вебера с идеями Максвелла произошло только у Лоренца в восьмидесятые годы. Электронная теория Лоренца (электродинамика Лоренца) – это то, где впервые идеи природы тока соединяются с уравнениями Максвелла.

«Динамическая теория электромагнитного поля»

1864 год, «Динамическая теория электромагнитного поля». Здесь появляются волновое уравнение, законченная система уравнений. Если записывать в современных обозначениях, то эта системы примет примерно следующий вид:

$$\begin{cases} \mathbf{j}_{\text{полный}} = \mathbf{j} + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}; & \text{rot } \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_{\text{полн}}; \\ \mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}; & \mathbf{E} = -\left[\mathbf{B} \times \frac{\mathbf{v}}{c}\right] - \nabla\varphi - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}; \\ \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}; & \text{div } \mathbf{D} = 4\pi\rho; & \text{div } \mathbf{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0; \end{cases}$$

В эту систему включено преобразование полей, материальные уравнения с константами, закон Ома.

Особенность этого труда заключается в том, что в нем нет никаких попыток объяснений, касающихся упругой или вязкой среды – эфира.

Экспериментальное объяснение теории Максвелла

Измерение диэлектрической проницаемости

Давайте теперь поговорим о дальнейшей судьбе теории Максвелла. Ситуацию здесь можно сформулировать следующим образом. Есть вещи, которые, быть может, малоизвестны, но очень существенны для понимания развития науки.

В данном случае, речь идет о роли диэлектрической проницаемости. В современном образовании она возникает сразу, как школьник знакомится с электростатикой. Далее, измерить диэлектрическую проницаемость конкретного материала тоже не представляется сложным – достаточно измерить и сравнить емкости заполненного и пустого плоского конденсатора.

Первым на существенную роль диэлектрической проницаемости обратил внимание Фарадей. Максвелл затем поставил эту константу в знаменатель в формуле скорости света в среде. Соответственно, для среды, у которой есть диэлектрическая проницаемость ϵ , а магнитная проницаемость $\mu = 1$, мы сразу можем найти показатель преломления, $n = \sqrt{\epsilon}$. Уже с пятидесятих годов 19 века умели достаточно точно измерять скорость света в земных условиях. Поэтому имелась мотивация измерить диэлектрическую проницаемость, чтобы проверить теорию Максвелла.

Среди тех людей, которые отнеслись серьезно к теории Максвелла (а таких было, к сожалению, немного), был Людвиг Больцман. Он, параллельно с работами в области статистической физики, занимался измерением диэлектрических проницаемостей различных сред. При этом стоит обратить внимание, что людьми, которые занимались экспериментальной проверкой теории Максвелла, часто не учитывались такие явления, которые сейчас известны даже школьнику. Например, где-то не учитывалась дисперсия – экспериментами на волнах с разными длинами могли давать разные результаты.

Отношение научного сообщества к теории Максвелла

Отношение научного сообщества к теории Максвелла было неоднозначным. Если в Британии авторитет Максвелла был достаточно высоким и актуальность его электродинамики даже не особо обсуждалась, то в Германии – в центре физики того времени – теория Максвелла привлекла мало внимания. Поэтому так получилось, что поначалу даже не стоял вопрос о проверке теории Максвелла.

Ситуация меняется примерно в восьмидесятые годы 19 века. С теорией Вебера долгое время все было хорошо. Вплоть до определенного времени электродинамика квазистационарных токов прекрасно подтверждалась на опыте. Но мы часто умалчиваем о том, что в истории физики очень редко отказывались от теорий по идейным соображениям. А Максвелл, что интересно, создал новую теорию практически без каких-либо экспериментальных аргументов. У Фарадея были тоже сугубо философские аргументы. Ему не нравился подход дальнодействующих сил, нужно было объяснение с учетом локальности. Максвелл развил эти идеи, но, развивая свою теорию, он не основывался на каких-то экспериментах, которые опровергали существующие до этого теории.

Таким образом, получалось, что теория Максвелла не имела под собой мотивационной базы. У электродинамики дальнодействия не было ни экспериментальных противоречий, ни внутренних. В связи с этим в глазах общественности теория Максвелла оказалась не вполне аргументированной. Тем не менее, ситуация понемногу изменялась.

Теория Гельмгольца

Во времена признания электродинамики дальнего действия (сороковые годы 19 века) утвердился принцип сохранения всеобщей энергии. Гельмгольц (наиболее авторитетный физик в Германии) был приверженцем концепции сохранения энергии. В то же время, он сам считал, что сохранение энергии однозначно связано с тем, что силы не должны зависеть от скорости. И по этой причине ему не нравилась теория Вебера, в которой такие силы как раз-таки присутствовали. Потому что наличие сил, зависящих от скорости, приводит к проблемам с сохранением энергии.

На самом деле, мы теперь знаем, что Гельмгольц не прав, так как можно привести пример таких систем, в которых силы зависят от скорости, но энергия, тем не менее, сохраняется. В качестве примера можно взять, кстати, и теорию Вебера, надо лишь по-другому ввести саму энергию. Гельмгольц был не совсем прав в том, что достаточное условие сделал необходимым. На самом деле, для сохранения энергии условие зависимости силы только от координат является лишь достаточным, но не необходимым.

К семидесятым годам 19 века эта ситуация изменилась дальше. И здесь стоит упомянуть про влияние некоторых философских идей на развитие физики. Как вы помните, на первой лекции мы такие примеры приводили. Если говорить про конец 19 века, то здесь существенную роль играли идеи эмпириокритицизма и позитивизма – эти концепции были популярны в то время. В частности, сама конструкция механики была подвергнута логической ревизии. Одной из задач позитивистов было выявление внутренних противоречий в теории Ньютона (напомню, это считалось главной функцией философии по отношению к науке). В частности, выяснилось, что к очень нехорошим последствиям приводит существование сил, которые зависят от ускорения.

В современном изложении теоретической механики силы не должны зависеть от ускорения. Если выполняется обратное, то, грубо говоря, мы можем вынести ускорение за скобки и получить что-то вроде эффективной массы. В теории Вебера такое проделать можно. Получается, что масса будет определяться ускорением. И при определенном расстоянии между взаимодействующими частицами эффективная масса обращается в ноль. Результат можно интерпретировать как бесконечную реакцию на конечную силу, что не является физически хорошим ответом.

Вы сейчас можете вспомнить силу торможения излучением в электродинамике. Но в этой теме используется не сама механика Ньютона, а асимптотическое разложение взаимодействия зарядов, к которому надо относиться аккуратно.

Этот аспект четко проявился только в конце восьмидесятых годов 19 века. И Гельмгольц, который был в курсе этой ситуации, попытался сам модифицировать этот проблемный вопрос электродинамики. Он рассмотрел, с одной стороны, необходимость объяснение всех известных явлений в физике квазистационарных токов – закон Ампера, Кулона, и так далее. С другой стороны, необходимо обойтись без сил, зависящих от ускорения.

Теория, созданная Гельмгольцем, была достаточно своеобразной. Согласно ей, в правую часть уравнения Максвелла с $\text{rot } \mathbf{H}$ вместо тока смещения надо поставить производную по времени от поляризации среды, $\partial \mathbf{P} / \partial t$. Получающиеся уравнения будут весьма похожи. Но в пустоте, где нет диэлектрика (и, как следствие, нет поляризации), не будет никакого тока смещения. Не будет и электромагнитных волн. А вот в среде будет и волновое уравнение, и прочие прелести. Однако это будут именно волны, которые отсутствуют в пустоте. И поскольку в качестве альтернативы уже достаточно давно существовала теория Максвелла, то этот вопрос надо было проверить.

Генрих Герц

Гельмгольц стимулировал молодого физика Генриха Герца, который тогда только приступал к научной деятельности, к проверке этой самой альтернативы. К этому моменту ситуация существенно изменилась. В 1876 году, тоже под влиянием Гельмгольца, был проведен опыт Роуланда, который сыграл чрезвычайно большую роль. Опыт Роуланда заключался в доказательстве того, что магнитное поле при конвективном токе (который представляет собой перемещение микроскопического заряда) является таким же, что и при протекании эквивалентного «нейтрального» тока \mathbf{j} . Известно, что плотность тока в нейтральной в целом среде не зависит от системы отсчета. Зависимость появляется при рассмотрении конвективного тока. Ведь если перейти в систему отсчета, связанную с зарядом, то движение зарядов прекратится вообще.

Таким образом, тот факт, что конвективный ток производит такое же магнитное действие, что и ток проводимости, был воспринят современниками очень горячо. И в конце восьмидесятых годов уже никто не сомневается в формуле Вебера $\mathbf{j} = \rho \mathbf{v}$. Поэтому теорию Максвелла надо было преобразовать. Ведь, согласно ей, электрический ток есть результат действия электрического поля на проводник по дифференциальному закону Ома. Движение заряда при этом не видно.

После опытов Роуланда Герц стал рассматривать теорию Максвелла с новой природой тока, которая связана чисто с движением зарядов. При этом надо четко

делить результаты деятельности Генриха Герца на два направления – экспериментальные открытия и теоретические.

Опыты Герца

В экспериментальной области, Герц создал так называемый вибратор Герца, где он использовал идею «порчи» колебательного контура. Чтобы повысить частоту и эффективность излучения электромагнитных волн, можно ухудшить емкость (вместо плоского использовать два куска провода) и индуктивность. Тогда, по формуле Томсона, получается довольно высокая частота. Согласно теории Герца (обсудим ее позже) получалось, что при этом возникало приличное излучение.

Далее, он догадался сделать разрыв такого колебательного контура (два провода и посередине маленький промежуток). К концам проводов прикладывается разность потенциалов, и в результате пробоя цепь замыкается, при этом возникает колебательное движение. Благодаря такой конструкции он получил доказательство эффективности теории Максвелла – он получил стоячие волны в помещении.

В качестве приемника этих волн он использовал такой же вибратор. И если на приемном вибраторе наблюдался пробой, то это означало, что приемник стоит в месте пучности электромагнитной волны. Таким методом можно было найти длину стоячей волны (у Герца она составляла примерно полметра).

Из теоретических соображений можно рассчитать частоту волны (как это сделать – отдельный вопрос). Итоговое соотношение между частотой и длиной стоячей волны было именно таким, какое следовало из теории Максвелла. Причем наблюдаемые волны распространялись именно в воздухе, то есть в пустоте. А распространение волн в пустом пространстве предсказывала именно теория Максвелла.

Теория дипольного излучения Герца

Но получение таких электромагнитных волн – это лишь первая часть задачи. Здесь надо подчеркнуть заслугу Герца как теоретика. Именно он создал теорию дипольного излучения. Он показал, что если разорвать связь тока с законом Ома (а для систем, которые он исследовал, одного закона Ома недостаточно), то можно сформировать сам механизм излучения. Сегодня мы говорим о его теории как о классической теории излучения.

Под классической теорией излучения мы понимаем теорию, развивавшуюся в начале 20 века. В ней излучением называется не просто распространение волн, а их формирование. Она описывает возникновение электромагнитного излучения из каких-

либо других форм энергии. В вибраторе Герца волны формируются лишь после пробоя, который сгенерировал заряды на проводах. Впоследствии они распространяются в пространстве и могут поглощаться на другом вибраторе - на приемнике.

Таким образом, надо понимать, что в теории Максвелла волны лишь распространяются. Процесс их излучения был предметом исследования уже теории Герца. И довольно долгое время никакой альтернативы для теории Герца не существовало. Она лишь была немного дополнена Лоренцом и Дираком (силы торможения Лоренца-Дирака).

Петр Николаевич Лебедев

В продолжение этого разговора обратим внимание на следующий момент. В подтверждение теории Максвелла внесли существенный вклад эксперименты Петра Николаевича Лебедева (1866-1912). Один из его опытов – эксперимент по определению давления света (1900) – вам известен еще из школы. Но еще несколько раньше (в 1895) Лебедев смог повторить опыты Герца. Дело в том, что конструкция эксперимента Герца позволяла тому получать излучение лишь фиксированной частоты, которая была весьма далека от оптического диапазона. И в опытах Лебедева частота была в 100 раз больше, а длина волны излучения получалась в районе 6 мм. По сути, это был плавный переход в область инфракрасного излучения, методы исследования которого уже были известны.

Последующее развитие теории

Обсудим в качестве послесловия последующее развитие теории электромагнитного поля. Во-первых, стоит снова упомянуть развитие классической теории излучения (теории Герца). Далее, практически в одно время с Герцем (1885-1888), Хевисайд стал использовать дифференциальные операторы, которые позволили ему записать уравнения Максвелла в практически современной форме. Кроме этого, в Англии различные ученые активно развивали и дополняли теорию Максвелла. Например, Пойтинг проанализировал закон сохранения энергии в общем виде. Оказалось, что имеет место замечательный вектор плотности потока энергии, с помощью которого можно записать закон сохранения энергии.

В современном курсе электродинамики, который вы не так давно изучали, сопоставляют вектор Пойтинга с тензором энергии-импульса электромагнитного поля. В этот тензор помимо самой плотности потока энергии входит и другие компоненты (например, компоненты тензора напряжения Максвелла). Вообще, существование такого тензора есть особое свойство электромагнитного поля. По сути, из его

существования следует, что плотность импульса как-то соответствует плотности потока энергии. Все эти идеи в тензорном виде впервые сформулировал Пуанкаре в самом конце 19 века.

Также был предсказан и измерен момент импульса электромагнитного поля – как вариант поляризации электромагнитных волн.

Стоит пару слов уделить еще одной интересной проблематике, которую подняли в Великобритании. Еще задолго до открытия электрона, Джозеф Джон Томсон задумался над расчетом энергии заряженного шара, движущегося с некоторой скоростью. Он хотел учесть и теорию Максвелла, и опыт Роуланда. Согласно первой теории, такой движущийся шар является источником электромагнитного поля. Также возникает ток, связанный с движением этого шара. В первом приближении (для малых скоростей) получалось, что магнитное поле, имея пространственно неоднородную конфигурацию, все же пропорционально первой степени скорости. Тогда энергию магнитного поля можно рассчитать, интегрируя по всему пространству. Получившаяся полная энергия оказывается пропорциональной квадрату скорости.

Из такого результата следовало, что энергия магнитного поля является добавкой к кинетической энергии (которая тоже пропорциональна квадрату скорости). То есть, в полную энергию шара, помимо исходной кинетической энергии, входит вклад, связанный с электромагнитной природой. В связи с этим возник вопрос – а нужна ли вообще эта исходная кинетическая энергия? Может быть, движущийся заряженный шарик обладает инерцией потому, что он обладает магнитным полем?

После дальнейшего развития этой мысли выяснилось, что при точных расчетах возникает более сложная зависимость энергии магнитного поля от скорости движения. Но все равно, вынося квадрат скорости за скобки, можно оставшийся коэффициент считать эффективной массой, которая, разумеется, будет зависеть от скорости. Таким образом, модифицированная теория Максвелла конца 19 века пришла к выводу, что движущаяся заряженная частица должна обладать массой, зависящей от скорости. И когда впоследствии были открыты близкие к точечным, обладающие зарядом и массой частицы (например, электрон), то природу массы такой частицы пытались объяснить на основе вышеупомянутой модифицированной теории Максвелла.

Лекция 8. Формирование молекулярно-кинетической теории, термодинамики и статистической физики.

Сегодня мы начинаем важную тему, которая будет состоять из двух лекций – история формирования молекулярно-кинетической теории, термодинамики и статистической физики. Сегодня мы займемся двумя вопросами.

Во-первых, мы с вами уже дошли до первой половины 19 века и продвигаемся к его середине. В это время произошли достаточно существенные изменения в представлениях о физике тепловых явлений. Именно эти изменения и будут объектом нашего рассмотрения в первом вопросе.

Во-вторых, мы обсудим возникновение микроскопической модели вещества. Эту модель – молекулярно-кинетическую теорию – вы все хорошо знаете. В середине 19 века она возникает практически в том виде, в котором вы сейчас ее изучаете.

План:

Утверждение химического атомизма. Физика газов.

- Возникновение идеи химического элемента – Р. Бойль (17 век). Но это все еще натурфилософский атомизм.
- Постоянство химического состава химических соединений (Пруст, 1812).
- Открытие и исследование газов – компонентов воздуха. Роль паров воды в тепловых свойствах воздуха.
- Кратные весовые отношения веса химических элементов – Джон Дальтон.
- Кратные объемные отношения газов в химических реакциях (Гей-Люссак, 1809). Трудности с $H + Cl = HCl$ - получились 2 объема HCl .
- Идея двухатомных молекул газов (Амедео Авогадро, 1811). Противоречие с теорией химического сродства Берцелиуса.
- Выяснение основных тепловых свойств газов – законы Шарля, Гей-Люссака и Клайперона. Единый коэффициент теплового расширения газов, $\alpha = 0.00375$. Измерение теплоемкостей газов, адиабатический процесс

Физика тепловых явлений в первой трети 19 века. Формирование идеи сохранения энергии.

Продолжение подъема картезианских настроений в физике середины 19 века.

Идея сохранения энергии и единство физики.

- Продолжение развития физики тепла до 1830 года на основе концепции теплохода. Теплопроводность Фурье (1822)

$$J = -\kappa \nabla T$$

- Опыты по сверлению (Бенджамен Томсон) и трению льда о лед (Хэмфри Дэви, 1798-1799). Закон Дюлонга-Пти о молярных теплоемкостях твердых тел.

Предпосылки возникновения идеи сохранения энергии:

- Работа как практическая мера действия тепловых машин (Лазарь Карно, 1783)
- Исследования реальных превращений различных типов физических явлений друг друга и необходимости введения единой количественной меры таких превращений.
- Волновая природа света в противовес концепции истечения.
- Философские идеи единства природных закономерностей (Гегель, Шеллинг)

Окончательное установление закона сохранения энергии.

Роберт Юлий Майер, «О количественном и качественном определении сил», 1841, «Замечания о силах неживой природы», 1842:

- Феноменологическая концепция, идея совокупного сохранения и взаимного превращения сил. Тепло возникает из движения
- Соотношение Майера, $C_p - C_v = R$. Механический эквивалент теплоты

Герман фон Гельмгольц, «О сохранении силы», 1847:

- Идея микромоделей явления
- Баланс энергии в электрических цепях и энергия конденсатора

Роберт Джоуль, экспериментальные доказательства закона сохранения энергии (1841-1843 и позднее):

- Электрическое тепло, баланс энергии в электрических цепях
- Эксперименты с газами и молекулярно-кинетической теорией
- Точные измерения МЭТ (механического эквивалента теплоты) в чисто механическом опыте

Возникновение термодинамики. Необратимость физических явлений.

Сади Карно, эффективность тепловой машины:

- КПД идеальной тепловой машины $\eta = \alpha(t_1)(t_1 - t_2)$

Вильям Томсон, 1848-1852 – начала термодинамики и циклы;

- Использование подправленной идеи Карно и введение абсолютной температуры

$$\alpha(t) = \frac{1}{(t + 273^\circ)} = 1/T$$

Рудольф Клаузиус, 1850-1854 – введение понятия энтропии:

- Неравенство Клаузиуса, обратимые и необратимые процессы в термодинамике

Специфические свойства тепла и необратимость в природе, 1852-1874:

- Противоречие с механикой. Однонаправленность процессов в термодинамике.

Утверждение химического атомизма. Физика газов

Мы начнем наше рассмотрение с обсуждения важного аспекта – с утверждения химического атомизма. Именно достижения химической науки позволило идее атомизма войти в естествознание. Как вы помните, еще на первой и второй лекциях мы говорили о философском атомизме и обсуждали связь нашей науки с античной натурфилософией. Философский атомизм занимал в античной натурфилософии важное место, и многие ученые 17 века, которые развивали новую физику, были приверженцами как раз-таки атомистических позиций. Но эта атомистика все еще была философской.

В литературе вы сможете найти упоминание о том, что Роберт Бойль, знаменитый физик, химик, один из основателей Лондонского Королевского общества, имел атомистические взгляды. В его трудах присутствуют идеи о химических элементах и химических соединениях. Но такой атомизм все равно оставался философским, потому что не удавалось привести хоть сколько-нибудь убедительные аргументы в пользу такой концепции.

Ситуация начинает существенно меняться в самом конце 18 века – начале 19 века. В 1812 году Пруст, основываясь на результатах опытов, сформулировал идею постоянства химического состава химических соединений. Но здесь стоит акцентировать внимание на том, что важную роль в развитии молекулярно-кинетических идей сыграли исследования физики газов.

Сама «физика газов» не могла возникнуть до конца 18 века, потому что именно в этот период успехи химии привели к возникновению последовательного понимания устройства и состава воздуха. Именно тогда удалось узнать, из каких компонент состоит воздух, и какие газы в его состав входят. Также в это время удалось установить вклад паров воды в тепловые свойства воздуха. Более подробно эти вопросы мы обсудим немного позже.

Далее, обсудим важный вклад в развитие физики газов известного ученого Джона Дальтона. С точки зрения реального естествознания, Дальтон был великим химиком. Я бы даже сказал, что он был основателем теоретической химии. Из практических достижений химии того времени у Дальтона возникает идея возможности количественных измерений, установление такого понятия, как вес элемента. Мы все знакомы с периодической таблицей Менделеева. Но ведь идея об исследовании химических свойств элементов как функций от их атомного веса должна была базироваться на самой возможности определения этого атомного веса. И одна из заслуг Дальтона состоит в том, что он обосновал такую возможность.

В принципе, можно понять, из каких соображений Дальтон пришел к такому выводу. Отталкиваясь от идеи существования простейших химических элементов, можно провести химические реакции с их участием и посмотреть на весовые пропорции между реагирующими компонентами.

Также существенную роль сыграл факт, к которому в 1809 году пришли и Дальтон, и Гей-Люссак. Оказалось, что в химических реакциях с газами возникают не только весовые соотношения, но и объемные. Впоследствии эти наблюдения вылились в утверждение о том, что при одинаковых внешних условиях, в одном и том же объеме газов содержится одинаковое количество тех частиц, из которых этот газ состоит.

На основе всех этих результатов укрепились и утвердилась теория атомизма. Но стоит отметить трудности, которые возникают сразу же после утверждений Гей-Люссака. Самая знаменитая трудность – это реакция образования хлористого водорода, $H + Cl = HCl$. Концепция молекулы тогда еще не существовала. Сегодня мы знаем, что все простейшие известные в то время газы на самом деле являются двухатомными молекулами.

Но идея о многоатомных молекулах утвердилась не сразу. Сначала идеи молекулы противоречила концепции химического сродства Берцелиуса. Идея Берцелиуса говорила, что молекулы образуются потому, что они, изначально имея некоторый заряд, притягиваются как заряженные частицы. В результате такого электрического притяжения образовывались нейтральные молекулы. Так вот, с точки зрения такого подхода, было непонятно, как могут образоваться молекулы из одинаковых атомов. Тем не менее, идея о двухатомных молекулах формируется в 1811 году как главный итог деятельности Амедео Авогадро – выдающегося итальянского химика и физика. Исходя из концепции двухатомных молекул, несложно объяснить реакцию образования двойного объема хлористого водорода.

Если подводить итог, то стоит сказать, что к середине второго десятилетия 19 века мы наблюдаем резкое изменение ситуации (по сравнению, скажем, со взглядами двадцатилетней давности). Если в конце 18 века атомизм был совершенно абстрактен, то теперь идея о химическом элементе, химических соединений, приобрела конкретный вид. Понемногу стали формироваться правильные химические веса. За единицу принимали вес водорода, остальные веса определяли в пропорциях. Из-за такого определения, конечно, еще долго не могли знать, сколько конкретно частиц находится в фиксированном объеме.

Кстати, здесь можно немного обсудить понятия моля и числа Авогадро. Если первое из этих понятий, в принципе, было уже сформировано, то второе было введено

не сразу. Сам Авогадро не знал, сколько частиц находится в одном моле, и такое число ввести не мог. Эта константа появилась намного позже и была одной из основных результатов достижений трудов Макса Планка, в 1900 году. Таким образом, весь 19 век было неизвестно число частиц в одном моле.

Обсудим еще одно замечание. Да, атомистические идеи были замечательными, но поначалу они никак не были связаны с тепловыми эффектами. Замечательные газовые законы формируются лишь позже. Кроме этого, надо отметить, что Джон Дальтон был сторонником идеи теплорода. Ведь десятилетия 19 века были пиком популярности теории теплорода, о котором мы будем говорить немного позже. Тем не менее, после успешного осушения воздуха и его разделения на компоненты, удалось получить коэффициент теплового расширения. Оказалось, что он одинаков практически для всех газов, $\alpha = 0.00375^\circ\text{C}^{-1}$. Такое единое свойство для всех газов было интересно. Стало понятно, что тепловые свойства газов относительно просты.

Первым из газовых законов был открыт закон Гей-Люссака. Как мы уже обсуждали, к нему приложил руку и Джон Дальтон. Как известно, Клайперон в тридцатые годы 19 века объединил известные газовые законы и получил известную вам формулу – уравнение состояния газов.

Физика тепловых явлений в первой трети 19 века. Формирование идеи сохранения энергии

До настоящего момента мы делали основной упор на возрождении идей атомизма. А то, что мы будем обсуждать сейчас, на определенной стадии с атомизмом никак не связано. Мы уже говорили о том, как развивалась физика тепловых явлений, и теперь мы к этому снова возвращаемся. Вы видим, что, несмотря на подъем картезианских настроений, еще достаточно долго продолжает развиваться вещественная концепция тепла. Вершиной этого развития является установленный в 1822 году закон теплопроводности Фурье:

$$J = -\kappa \nabla T$$

Именно тогда Фурье опубликовал знаменитую «Аналитическую теорию теплоты». Интересно, что попытки сформулировать подобный закон наблюдались и раньше. Было известно, что чем выше разность температур между телом и окружающей средой, тем больше его теплоотдача. Как мы видим, начало 19 века – это эпоха утверждения замечательных математических методов, связанных с дифференциальными уравнениями и дифференциальными операторами в частных

производных. Именно такие уравнения и возникают, когда мы рассматриваем теплопроводность.

При этом, считается, что в явлении теплопроводности не происходит работы. Поэтому первое начало термодинамики не противоречит идее сохранения «теплоты». Таким образом, у Фурье получилась достаточно последовательная теория, несмотря на то, что он был сторонником вещественной природы тепла. В его формуле под J изначально подразумевался поток теплорода, под k – коэффициент теплопроводности, а под ∇T – градиент температур.

В то время проводилась определенная аналогия с электричеством. Чуть позже появляться дифференциальный закон Ома, в котором плотность тока (то есть, плотность потока электричества), пропорциональна градиенту потенциала. В ту эпоху рассматривались еще множество других процессов переноса, но из этих различных сохраняющихся величин самым незыблемым законом был только закон сохранения заряда. Действительно, трактовка закона Ома осталась практически неизменной с двадцатых годов 19 века. А что касается тепла, то сегодня мы понимаем, что оно может рождаться из работы. Но, тем не менее, уравнение теплопроводности было очень важным.

Далее, остановимся на следующем моменте. В «Аналитической теории тепла» Фурье было другое известное вам уравнение. Некоторые его называют уравнением нестационарной теплопроводности. Для математиков это уравнение параболического типа. Иногда его называют уравнением температуропроводности. И Фурье сделал важный шаг – для решения этих уравнений он применил метод, который затем был распространен на все дифференциальные уравнения в частных производных – метод рядов и интегралов Фурье.

Упомянем еще один интересный результат, полученный в это же время – закон Дюлонга и Пти. В дальнейшем, именно на интерпретации этого закона покоилась дальнейшая судьба молекулярно-кинетической теории Максвелла и Больцмана. Речь идет о теплоемкости твердого тела. Во-первых, как вы знаете, понятие теплоемкости возникло еще в 18 веке, но до точных измерений дело дошло не сразу. Поэтому первые точные исследования мы находим в начале 19 века. Во-вторых, суть закона состоит в том, что молярная теплоемкость твердого тела представляет собой определенную величину. А само понятие моля возникает только в результате развития химии.

Дальнейшая ситуация развивается уже довольно драматически. Пик концепции теплорода приходится на 2 и 3 десятилетие 19 века. В 4 десятилетие 19 века происходит резкий переход от вещественной концепции теплорода к другой

интерпретации – к тому, что теплород есть проявление закона сохранения энергии с определенной стороны.

Предпосылки возникновения идеи сохранения энергии

В качестве предпосылок такого резкого перехода отметим следующие несколько моментов. Во-первых, обратила на себя внимание практическая компонента. В развитии физики тепловых явлений интересно то, что в ней есть некий штамп, по большому счету, неправильный. Согласно ему, если производительным силам общества что-то нужно, если с их стороны есть некоторый запрос, то науки отвечают на этот запрос и помогают что-то создать. Такой подход не работает, как вы прекрасно знаете. Очень часто идут разговоры о необходимости новых источников энергии. И, вспоминая статьи в научных журналах моей школьной молодости, посвященные термоядерному синтезу, я замечая, что за полвека мы особо никуда не ушли. В этой области не так-то просто произвести скачок вперед. Более того, от фундаментальной науки не стоит требовать практической значимости, особенно в наше время. Как вы помните, Ньютон занимался, казалось бы, совершенно абстрактными и ненужными вещами – гравитация тел различной формы. Ситуация изменилась лишь через 100 лет в совершенно неочевидном направлении.

В истории физики есть один случай, когда развитие шло от практики к фундаментальной физике. С тех пор осталась масса терминов, которые имеют лишь фундаментальный смысл. Но появились они из практики. Этот пример как раз произошел в развитии физики тепловых явлений.

Обратим внимание на тепловые машины. Паровая машина была изобретена инженерами в 18 веке и долгое время совершенствовалась без какой-либо опоры на теоретические и физические исследования. Эта машина была сугубо инженерное, практическое решение, как и многие другие изобретения (например, подзорная труба). Тем не менее, широкое применение паровых машин в 18 веке привело инженеров, занимавшихся совершенствованием машин, к определенным выводам.

В 1783 году замечательный инженер, физик и математик Лазарь Карно, отец известного вам Сади Карно, стал говорить о необходимости измерять эффективность действия тепловых машин. В качестве такой величины он предложил работу. Было логично использовать этот термин в теоретической механике того времени, так как семидесятые годы 18 века публикуется теоретическая механика Лагранжа с интегралами движения. В то время казалось, что роль сохраняющихся величин, которых поначалу было немного. В 17 веке дискутировали о том, что есть мера движения. Возникали новые величины, например, количество движения у Декарта.

Торричелли, как вы помните, сформировал свой принцип о «живой силе», которую мы сейчас называем кинетической энергией.

В семидесятые годы 18 века в теоретической механике публикуется «Аналитическая механика» Лагранжа, в которой возникает концепция интегралов движения. С точки зрения формального подхода, в не слишком продвинутой в дифференциальных уравнениях эпохе появилась следующая идея. Если система состоит из N точечных частиц, то должно существовать $6N$ интегралов движения. Вслед за этим, интегралы движения поставили в один ряд с известными сохраняющимися величинами – импульсом, моментом импульса.

Таким образом, с теоретической точки зрения, значение такой физической величины, как работа, было нивелировано. А с точки зрения практического подхода все было наоборот. Люди, занимавшиеся разработкой тепловых машин, видели, что их действие как раз и определяется этой работой. Они поняли, что, например, количество поднятой из шахты руды на столько-то метров и есть мера действия машины.

Следующей предпосылкой формирования закона сохранения и превращения энергии была продолжающаяся тенденция к слому перегородок между различными разделами физики. Эту тенденцию мы уже обсуждали, когда рассматривали физику электромагнетизма. Она же имеет место и в других разделах физики. Возникает необходимость введения какой-то меры таких превращений.

Далее, важную роль в установлении вещественной концепции тепла к концу 18 века сыграло открытие инфракрасных тепловых лучей. Выяснилось, что тепло может распространяться через теплоту, что свойства таких лучей похожи на свойства света (отражение, преломление). В это время (в конце 18 века) была более популярна корпускулярная гипотеза. Поэтому, так как свет есть поток корпускул, то и тепло, при передаче от одного к другому телу через пустоту, есть частицы теплорода. И многие ученые рассматривали открытие и изучение свойств инфракрасных лучей как подтверждение концепции теплорода.

В двадцатые годы 19 века ситуация резко меняется. Свет становится волной, которая представляет собой некие колебания эфира. Такая смена взглядов на природу света заставила ученых по-другому взглянуть и на природу тепла. Теперь было более естественно предложить кинетическое объяснение тепловых явлений, вслед за концепцией света – колебаний эфира.

Наконец, как предпосылку формирования закона сохранения энергии упомянем влияние идей натуральной философии (например, учений Гегеля). В ней возникают идеи единства и взаимосвязи всех физических явлений.

Итак, самые главные предпосылки мы обсудили. Теперь рассмотрим сами события, с окончательным формированием закона сохранения энергии. Речь пойдет о периоде с 1840 по 1849 годы.

Если в начале сороковых годов, казалось бы, никаких резких изменений не было, то к концу сороковых годов уже спорили не о том, какая концепция более правильная, а о том, кто обладает приоритетом и кого надо хвалить и ставить в качестве пионера таких исследований. И интересно, что этот спор о приоритете принял довольно драматический характер.

Прежде чем мы перейдем к конкретным вещам, я упомяну еще один интересный момент. В качестве примеров того, что тепло не является сохраняющейся величиной и может рождаться из ничего, можно привести, например, трение каких-то тел. Надо сказать, что такие исследования проводились за 30-40 лет до описываемых нами событий. В начале 19 века были опубликованы исследования графа Румфорда, который наблюдал сверление жерл артиллерийский орудий. В то время сначала из бронзы делали отливки для изготовления орудий, а затем их сверлили, чтобы создать ствол. При этом выделялось огромное количество тепла. Для охлаждения использовали целые бочки воды, которые вскипали, поглощая тепло от трения. В рамках концепции теплорода нужно было объяснить, откуда это тепло берется. Современное объяснение требует введение диссипативных сил и трения. В то время, в рассуждениях графа Румфорда, таких идей даже не возникало.

Аналогично, английский физик Хэмфри Дэви исследовал трение льда. При трении кусков льда друг о друга они начинают плавиться. И нужно было объяснить, откуда берется столько тепла. Ведь теплота плавления льда есть величина немалая. Тем не менее, такие эксперименты не вызывали сомнения в истинности концепции теплорода. Говорили о том, что теплород находится в порах тела, и при трении он как бы выдавливается из этих пор.

Окончательное установление закона сохранения энергии.

Именно в сороковые годы 19 века ситуация начала резко меняться. Давайте отметим, что эти события получили название «открытия закона сохранения и превращения энергии». Причем, я бы добавил, что это открытие было вехой в истории физики в целом. Возможно, такое название сбивает нас с правильной интерпретации тех событий, потому что сейчас закон сохранения энергии преподается в учебных курсах определенным образом. В механике закон сохранения энергии выводится из законов Ньютона, в термодинамике постулируется как первое начало термодинамики,

присутствует в электромагнетизме и электродинамике. Но надо сказать, что тогда это открытие было очень существенной вехой в развитии физики.

В то время больше внимание обращали не на слово «сохранение», а на слово «изменение». Главное, по сути дела, заключалось в том, что удалось продемонстрировать взаимные превращения физических явлений – электричества в магнетизм, химических явлений в гальванических элементах в тепло, и так далее. В экспериментах выяснилось, что существует некая мера этих взаимопревращений. И в этот момент физика сделала большой шаг в сторону единства.

Теперь обсудим конкретно персоналий, которые были в ответе за этот шаг. Моя задача заключается в том, чтобы довести до вас, кто что конкретно сделал.

Традиционно, отцами-основателями закона сохранения энергии считаются три человека. Мы можем заметить некую двойственность этого явления. С одной стороны, возникает энергия - единая величина. А с другой стороны, самые большие последствия этого открытия прочувствовала на себя физика тепловых явлений. Ведь если для электричества и магнетизма роль энергии была дополнительной, и закон сохранения энергии обсуждался довольно редко, то для тепловых явлений этот закон оказался крайне важен.

Роберт Юлий Майер

Первым делом обсудим вклад Роберта Юлия Майера. Как и два других основателя этой концепции, Майер не был «профессиональным» физиком. По образованию, он был врачом. Физикой он, конечно, интересовался, но подготовлен был плохо, и это было довольно заметно. Его идеи обобщения шли из практических и философских соображений. Будучи врачом, Майер работал в различных климатических условиях. Тогда основным методом лечения больных было кровопускание. Майер заметил, что цвет крови в южных и северных местах отличался.

Эта история почему-то очень хорошо запоминается студентам. Хотя, в общем-то, понятно, что такое наблюдение является косвенным свидетельством закона сохранения. Известно, что цвет крови определяется многими факторами (например, наличием кислорода в эритроцитах), и довольно слабо связан с температурой окружающей среды.

Роберт Майер подготовил две работы. В первой из них, в «О количественном и качественном определении сил», проявляется, что Майер замечательно мыслит философски, но физику знал плохо. Например, путался в определениях импульса и кинетической энергии, и так далее. Поэтому эту работу в физических немецких журналах того времени не опубликовали. После этого Майер немного переделал свою

работу. Разобрался в деталях, которые были ему неясны. И через год, в 1842, подготовил статью «Замечания о силах неживой природы», которую все равно не опубликовали в немецких физических журналах, но опубликовали в журнале медицинского профиля.

Какой же в этом труде был физический аргумент? Вы могли его запомнить, внимательно изучая курс молекулярной физики. Еще в хорошем школьном курсе упоминалось соотношение Майера. В статфизике, на самом деле, Майеров довольно много, но известное вам соотношение $C_p - C_V = R$, которое работает для идеального газа названо в честь именно Роберта Майера.

Я немного сэконобил на рассказе о развитии физики газов в начале 19 века и сейчас эту дырку восполню. Помимо замечательных тепловых газовых законов, которые были открыты в самом начале 19 века, было еще одно направление исследований – определение теплоемкости различных газов в различных процессах. Оказалось, что в зависимости от процесса, теплоемкость газов было различным.

В первом десятилетии 19 века были хорошо измерены C_p и C_V . Но никаких интерпретаций, объясняющих разницу между C_p и C_V , и почему одна из этих величин больше другой, не было. Роберт Майер же обратил внимание на это соотношений. Более того, он смог получить такую вещь, как механический эквивалент теплоты. Что это такое?

В то время тепло измерялось в калориях. Калории, как вы знаете, привязаны к нагреву воды. 1 калория теплорода требуется для нагрева 1 грамма воды на 1 градус. А в механике меру работы можно было ввести по своему – для поднятия 1 килограмма на 1 метр требовался, допустим, 1 килограмм-метр. Майер догадался, что механическую надо как-то сопоставить с разностью между C_p и C_V . Помимо этого, ему удалось установить связь механических единиц в определении работы с количеством теплорода, измеряемого в калориях. Таким образом, Майер достиг успеха в интерпретации чужих работ. Кстати, впоследствии Джоуль поставит в упрек Майеру именно отсутствие собственных исследований.

Далее, Майер имел свои соображения по поводу природы тепла. Очевидно, что тепло есть не сохраняющаяся величина. Причем концепцию Майера стали называть «механической» концепцией теплоты и приписывали ей феноменологический подход. Действительно, свои рассуждения он строил на результатах экспериментах и очень осторожно подходил к интерпретации понятия «тепло».

В любом случае, было понятно, что теплород не может претендовать на место сохраняющейся в тепловых процессах величины. И для трудов Майера характерна идея взаимопревращений сил природы.

Здесь интересен еще один момент, на который я призываю вас обратить внимание. Сам термин «сила» устоялся в физике лишь намного позже описываемых нами событий. Тогда, как и в более ранних трудах, слово «сила» используется в совершенно разных контекстах, мы это упоминали при обсуждении трудов Ньютона. В этом состоит главная терминологическая неприятность той эпохи. Вместо выражений «превращения сил в природе» было бы лучше использовать слово «энергия».

Поначалу, труды Майера не были дружно восприняты научным сообществом, что изменилось в обратную сторону в конце сороковых годов. Более того, на этой почве возник кризис, из-за которого Майер был вынужден лечиться от нервных заболеваний. Поэтому конец его жизни оказался достаточно непростым.

Герман фон Гельмгольц

Однако, в Германии имел место еще один замечательный человек – Герман фон Гельмгольц, родившийся в 1821 году. Надо сказать, что в немецкой физике этот человек был фигурой номер один. Но при этом, как и Майер, он был по исходному образованию врачом. Однако Гельмгольц был совершенно другим человеком. Он прекрасно разбирался в физике и при этом очень много всего в нее внес. По этой причине, к концу жизни Гельмгольц имел очень весомый авторитет в научном сообществе. Как вы помните, в восьмидесятые годы именно он вдохновил Генриха Герца на исследование излучения электромагнитных волн.

В 1847 году, двадцатилетний Гельмгольц опубликовал замечательную книгу о сохранении силы. Ее, кстати, тоже поначалу не хотели публиковать, считая получившиеся в ней результаты слишком абстрактными. Действительно, эта публикация имела мало отношения к практической физике.

Гельмгольц подходил к интересующим его вопросам со стороны теории. Именно он впервые заговорил о микроскопической модели тел, об их устройстве. Он считал, что все тела состоят из атомов и молекул, и между ними действуют дальнедействующие силы. Конечно, такие модели уже появлялись до этого, но у Гельмгольца она была связана с теплотой.

Кроме того, будучи врачом по образованию, Гельмгольц имел свою позицию в биологии и медицине - он был противником витализма. Напомню, что концепция витализма заключалась в том, что организмом управляют специфические живые силы,

которые не подчиняются законам «мертвой природы», то есть физики. Поэтому, с точки зрения виталистов, было бессмысленно применять тот же закон сохранения энергии к живым объектам. Гельмгольц, критикуя виталистов, все же имел своеобразные аргументы. Например, по его словам, виталисты представляют себе организм как вечный двигатель. И здесь нужно использовать какой-то закон сохранения, который бы не позволил создать этот вечный двигатель. Единственная подходящая микроскопическая модель, по Гельмгольцу, представляла собой систему компактных взаимодействующих частиц-атомов с дальнodelствующими силами, которые зависят от расстояния. В этом случае энергия будет сохраняться, и вечный двигатель не получится.

Мы-то прекрасно понимаем, что энергия может сохраняться даже в том случае, когда силы зависят от скорости. Так что такое утверждение Гельмгольца было не совсем правильным. Тем не менее, он отстаивал такую концепцию и со временем стал отцом-основателем микроскопической модели, которая впоследствии привела к возникновению молекулярно-кинетической теории.

Таким образом, мы видим, что у Майера был феноменологический подход, который еще можно назвать термодинамическим. С другой стороны был Гельмгольц с его кинетическим, микроскопическим подходом.

В исследованиях Гельмгольца имелся еще один существенный момент. Обсуждая его, мы будем параллельно говорить и о Гельмгольце, и о Джоуле, потихоньку переходя ко второму. Речь идет о применении законов сохранения энергии к электромагнитным цепям постоянного и переменного тока. И в данном разделе Гельмгольц внес конкретный вклад, который уже никак нельзя было назвать абстрактным рассуждением.

В целом, было понятно, что имеют места различные явления. В гальваническом элементе происходят химические процессы. И если в цепь включена электромагнитная система (мотор или генератор). В таких устройствах интересно исследовать баланс различных видов энергии и ее взаимные превращения. Гельмгольц занимался именно этими вопросами и его вклад заключается в следующем. Например, именно Гельмгольц первым написал формулу для энергии плоского конденсатора.

Роберт Джоуль

Итак, третьим человеком, который считается отцом-основателем концепции закона сохранения энергии, является Роберт Джоуль. Он, кстати, тоже не совсем профессиональный физик. По своей деятельности, он был владельцем пивоваренного

производства, а физикой занимался на досуге. Главная заслуга Джоуля заключается в экспериментальном доказательстве взаимопревращения и баланса энергии.

Остановимся на обсуждении некоторых деталей этого открытия. Все началось еще в тридцатых годах 19 века, когда Джоуль электрические цепи и обнаружил то, что мы сейчас называем законом Джоуля-Ленца. Причем Ленц упоминается в названии этого закона только в нашей стране. Ленц, будучи российским физиком, тоже занимался этими вопросами, но получил результаты немного позже Джоуля, которые, однако, не получили широкого распространения.

Итак, Джоуль обнаружил, что в электрической цепи выделяющееся на сопротивлении тепло пропорционально квадрату протекающего тока. И в этом контексте получается следующая ситуация. Если современный студент или школьник изучает эти законы, то он понимает, что закон Ома, вообще говоря, скорее экспериментальный, потому что вывести его откуда-нибудь практически невозможно. А с законом Джоуля-Ленца по-другому – известную формулу можно несложно получить, рассмотрев энергетический баланс.

Однако такая энергетическая интерпретация естественна лишь для нашего времени. В тридцатые годы, когда проводил свои эксперименты, сама природа тепла представлялась всем в виде теплорода. Пытаясь объяснить эксперименты по выделению тепла при протекании тока, некоторые ученые предполагали, что в результате электромагнитных процессов из проводника выдавливается теплород. Поэтому открытие Джоуля было действительно очень важным, что может не понять современный человек, не разбирающийся в хронологических последовательностях открытий.

Цепь в экспериментах Джоуля состояла из гальванического элемента, резистора (в котором и выделялось тепло) и электромагнитная система, которая могла работать как машина или генератор. Однако, стоит отметить, что эти пионерские исследования не обладали высокой точностью. Как минимум потому, что сложно было ввести механический эквивалент тепла для химических процессов, протекающих в гальваническом элементе.

Затем Джоуль исследовал те вопросы, о которых говорил Майер – баланс энергии в газовых процессах. Но, в отличие от Майера, Джоуль проводил собственные эксперименты над газами, в которых рассматривал ряд явлений, в том числе процесс Гей-Люссака (расширение газа в пустоту).

Наконец, Джоуль проводил классические опыты по определению механического эквивалента теплоты, который присутствует на обложках многих школьных учебников

– вращение лопаток в вязкой среде, куда опущены два груза. При вращении лопаток выделяется тепло, а по изменению положения грузов (вследствие нагрева) можно было определить механический эквивалент теплоты.

Возникновение термодинамики. Карно, Томсон и Клаузиус. **Необратимость физических явлений**

Далее, рассмотрим события 48-55 годов, которые напрямую связаны с возникновением термодинамики. Этот период можно рассматривать как завершение эпохи утверждения закона сохранения и превращения энергии, так и как новый этап в развитии физики тепловых явлений.

В разговоре об этом периоде мы снова возвращаемся к тепловым двигателям и к тому примеру, в котором результаты фундаментальной науки получились из практического применения тепловых машин. Отец-основатель термодинамики Вильям Томсон, позднее известный как лорд Кельвин, будучи еще молодым, в 1848 году обратил внимание на актуальную проблему. Вследствие «смерти» концепции теплорода, нужно было изменять физику тепловых явлений на основе закона сохранения и превращения энергии. Кроме того, вызвали большие вопросы «новые», специфические, недавно открытые свойства тепла. Эти особые свойства проявились в эффективности тепловых машин.

Томсон обратил внимание на известный труд Сади Карно, посвященный эффективности тепловой машины. В нем рассматривался, как вы знаете, идеальный цикл тепловой машины. Здесь любопытно то, что Карно опубликовал свой труд в двадцатые годы 19 века, когда еще господствовала теория теплорода. Карно рассматривал аналогию между тепловой машиной и обычной водяной мельницей. Работа водяной мельницы основана на том, что поток воды вращает лопатки мельничного колеса. При этом эффективность водяной мельницы определяется перепадом уровня высот воды. Развивая эту аналогию, Карно пришел к выводу, что КПД тепловой машины пропорциональны разности температур, которые показывают уровень теплорода в теле:

$$\eta = \alpha(t_1)(t_1 - t_2)$$

Коэффициент этой пропорциональности, $\alpha(t_1)$, сам Карно определить не смог. Он говорил о том, как сконструировать идеальную тепловую машину – она должна работать на совокупности адиабатического и изотермического процессов.

Томсон в 1848 году увидел в этих идеях некое дополнительное, фундаментальное свойство теплоты, которым нужно дополнить идею сохранения энергии. Таким

образом, именно из этих двух конструкций возникает известные нам два начала термодинамики. Затем, в 1852 году, термодинамика у Томсона возникает в полном объеме. Там же Томсон вводит идею квазистационарных циклов, происходящих с различными термодинамическими тепловыми системами. Здесь же он показал, чему равен коэффициент $\alpha(t_1)$ в формуле Карно.

Наконец, важнейшим моментом было введение абсолютной шкалы температур. До 1852 года, температура была неким эмпирическим коэффициентом, которая связывала тепловое расширение тел. Да, в сороковые годы были сделаны хорошие градусники – Реомюр, Цельсий и Фаренгейт. Но все-таки тепловое расширение не было равномерно во всем диапазоне, поэтому было непонятно, что же взять за самую основу – спирт, ртуть, или что-то еще. Оказалось, что с помощью теоремы Карно можно ввести абсолютную тепловую шкалу, что Томсон и сделал.

Параллельно свои исследования проводил немец Рудольф Клаузиус. Совершенно независимо от Томсона он публиковал работы, которые существенно дополняли труды Томсона. В них присутствовала идея возникновения энтропии, а также в них обсуждались специфические свойства процессов, как обратимость и необратимость. Вам известно неравенство Клаузиуса, которое и посвящено этому вопросу.

Наконец, в 1857 году Вильям Томсон догадался до того, что особые свойства теплоты затрудняют ее механические модели, которые всегда получались обратимыми. В термодинамике же имеет место необратимость, интерпретация которой с помощью механических моделей невозможна. Таким образом, именно Томсон впервые дошел до ключевого противоречия в интерпретации термодинамике.

Лекция 9. Формирование молекулярно-кинетической теории, термодинамики и статистической физики

Продолжим разговор об истории формирования молекулярно-кинетической теории, термодинамики и статистической физики. План лекции:

Возникновение молекулярно-кинетической теории в середине 19 века

- МКТ как продолжение кинетической теории гравитации (Герард, 1821 и Уотерстон, 1845) и кинетической трактовки закона Бойля о давлении газа (Бернулли, Ломоносов).
- МКТ как микромодель теплоты – Август Крениг, 1856:

$$p = \frac{1}{6} \frac{Nmc^2}{V}$$

- Рудольф Клаузиус, 1850ые годы
- Идея применения теории вероятности в МКТ, но по аналогии:

$$\frac{\delta c}{c} \div \frac{1}{\sqrt{N}}$$

- Дискуссия с Бейс-Баллотом о скорости молекул газов, $c_{N_2} = 402$ м/с; $c_{H_2} = 1844$ м/с. Идея средней длины свободного пробега молекул
- Идея равномерного распределения энергии по степеням свободы молекул
- Реальные газы и теорема вириала для вывода уравнения состояния.

Исследования Максвелла по МКТ в 60ые годы 19 века. Проникновение теории вероятности в физику.

- Первая работа – доклад 1859 года, в котором опубликовано распределение по скоростям – связь дисперсии с температурой системы:

$$f(v_x^2)f(v_y^2)f(v_z^2) = f(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$$

- Влияние теории ошибок в астрономии Гершеля. Решительное проникновение теории вероятности в физику.
- «Динамическая теория газов» 1866 года – новый вывод распределения по скоростям. **Концепция динамического хаоса** для парных столкновений.

$$f_2(v_1, v_2) = f(v_1)f(v_2);$$
$$f(v_1)f(v_2) = f(v'_1)f(v'_2)$$

- Максвелловские молекулы:

$$F(r) \sim r^{-5}$$

- Теория явлений переноса, основанная на кинетическом подходе. Независимость теплопроводности от давления.
- Споры с Томсоном об объяснении макроскопической необратимости – «демон Максвелла».

Людвиг Больман (1844-1906). Создание статистической физики.

Ранний период деятельности Больцмана:

- Объяснение теплового движения как квазипериодического движения (1866).
- Открытие **адиабатических инвариантов**.
- Знакомство с монографией Максвелла после 1868 года.

Утверждение и детализация МКТ Максвелла:

- Роль многоатомных молекул. Многоатомная молекула – система точек с потенциальными силами взаимодействия. Свободное движение. Функция распределения как функция энергии многоатомной молекулы:

$$f(W(\mathbf{r}_1, \mathbf{v}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{r}_n, \mathbf{v}_n))$$

- Идея столкновения многоатомных молекул.
- Различные пространства состояний.

Равновесие неидеальных систем и твердых тел:

- Равновесие изолированной неидеальной системы – эргодическое (микроканоническое) распределение – константа на поверхности постоянной энергии.

$$W_0 \leq W(\mathbf{r}_1, \mathbf{v}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{r}_N, \mathbf{v}_N) \leq W_0 + \delta W$$

- Смысл средних – как среднее во времени:

$$\frac{d\tau}{T} = f(x_1, y_1, \dots, v_{zN}) dx_1 dy_1 \dots dv_{zN}$$

- Равновесие газа во внешнем потенциальном поле:

$$f(\mathbf{r}, \mathbf{v}) = A \exp \left(-\beta \left(\frac{mv^2}{2} + U(\mathbf{r}) \right) \right), \quad \beta \sim \frac{1}{T}$$

- Многоатомная молекула как инструмент перехода к описанию равновесия неидеальных систем

$$f(\mathbf{r}_1, \mathbf{v}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{r}_n, \mathbf{v}_n) = A_0 \exp[-\beta W(\mathbf{r}_1, \mathbf{v}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{r}_n, \mathbf{v}_n)]$$

- Возникновение понятия ансамбля и фазовых средних.
- Метод функций распределения как приближенный механический метод (а не свидетельство актуальности теории вероятности)

Релаксация к состоянию равновесия. Согласование с МКТ и вывод второго начала термодинамики:

- Уравнение Больцмана и H-теорема (1873). Возникновение физической кинетики.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\mathbf{F}}{m} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{p}} = \int (f(\mathbf{p})f(\mathbf{p}_1) - f(\mathbf{p}')f(\mathbf{p}'_1)) \Psi(\mathbf{p}, \mathbf{p}_1, \rho) d\mathbf{p}_1 d\rho$$

$$H(t) = \int f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) \ln f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) d^3r d^3v; \quad \frac{dH}{dt} \leq 0$$

- Возражение – парадокс Лошмидта. В точной механике без диссипации замена $\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r}, \mathbf{v} \rightarrow -\mathbf{v}$ эквивалентна замене $t \rightarrow -t$.
- Ответ Больцмана 1877 года и первое явное утверждение Больцмана о статистической природе второго начала термодинамики.
- Понятие вероятности макроскопического состояния, $S \sim \ln W$
- Предварительные идеи в дискуссии В. Томсона и Дж.К.Максвелла в период 1866-1874 годов о статистической природе необратимости, о понятиях «вероятность макроскопического состояния» и статистической эволюции макроскопических систем.

Ситуация конца 70ых – 90ых годов 19 века. Кризисное развитие молекулярно-кинетической теории:

- Ограниченное количество удачных предсказаний новой теории.
- Накопление внутренних противоречий
 - Дискуссия в журнале Nature
 - Теорема возврата Пуанкаре. Парадокс Цермело-Пуанкаре
- Недооценка основателями теории возможности экспериментальных проверок теории по предсказаниям флуктуаций.
- Критика с методологических и философских позиций. Эмпириокритицизм Маха и энергетизм Оствальда

Статистическая физика Джозайи Уилларда Гиббса (1902):

- Уход от конкретной атомно-молекулярной модели вещества – абстрактное гамильтоновское описание системы.
- Отсутствие теории неравновесной динамики.

Дальнейшее развитие статистической физики:

- 1900 – Планк использовал модифицированный метод Больцмана для вывода спектра равновесного теплового излучения.
- Получение Планком конкретного значения констант – числа Авогадро N_A и постоянной Больцмана $k_B = R/N_A$.
- 1904 – Марин Смолуховский, «О нерегулярности в распределении молекул газа»
- 1905-1906 – Альберт Эйнштейн развивает теорию броуновского движения
- 1908-1909 – Жан Перрен проводит опыты, подтверждающие выводы Эйнштейна
- 1913 – Лоренц опубликовал «Обзор электронной теории металлов», в котором использовал метод Максвелла-Больцмана. В частности, здесь впервые приближенно решено уравнение Больцмана для диффузии легкого газа в тяжелом.

Дальнейшее развитие физической кинетики:

- Решение уравнения Больцмана. Вторая половина тридцатых годов 20 века. Метод Гильберта-Чепмена-Энскога приближенного решения уравнения

Больцмана. 5-моментное приближение в вязкой гидродинамике. «Локальное распределение Максвелла».

- Принципиально новое кинетическое уравнение для систем с дальним действием (плазма, гравитирующие системы) – уравнение Анатолия Александровича Власова в статье 1938 года, «О вибрационных свойствах электронного газа».
- Николай Николаевич Боголюбов в 1945 году ввел иерархию времен релаксации и стадий эволюции макросистем. «Проблемы динамической теории в статистической физике», 1946.

Возникновение молекулярно-кинетической теории в середине 19 века

На прошлой лекции мы рассматривали вопросы, связанные с предысторией возникновения молекулярно-кинетической теории. Рассмотрели ситуацию, которая сложилась в первой половине 19 века, когда картезианские тенденции привели к тому, что резко переменялась представление о природе тепла.

Напомню, что в сороковых годах окончательно формируется идея о сохранении и превращении энергии в физике. Но природа тепла до конца так и не была ясна. По этой причине, сороковые и пятидесятые годы 19 века можно назвать эпохой формирования молекулярно-кинетической теории. За этим периодом последует возникновение статистической физики и статистической механики. Именно об этом мы сейчас и поговорим

В этой теме имеется общий момент, который надо сразу обговорить. Дело в том, что рассматриваемый нами период обладает известной долей поучительности. Если вы откроете Википедию и найдете статьи, посвященные ученым, которые сегодня будут упоминаться, то вы увидите, что там написано что-то немного другое. Даже в книге Спасского акценты расставлены другим образом. Эти примеры иллюстрируют тот факт, что к любому вопросу надо относиться серьезно. Надо читать оригинальные труды отцов-основателей и разбираться в них. Что, кстати, довольно тяжело выполнить для людей гуманитарного склада ума. Да, они могут очень аккуратно изучить вопрос в исторической плоскости, но все же физика для них будет далека. Вы же, с другой стороны, лишь недавно изучили все эти разделы теоретической физики, и, надеюсь, хорошо их знаете.

Перейдем теперь конкретно к материалу. Прежде всего, надо отметить, что ситуация меняется в первой половине 19 века в связи с существенной ролью разреженных газов. Свойства этих газов удалось изучить намного точнее, чем в 18 веке. В 18 веке были неясны тепловые свойства газов, поэтому ученые того времени (Ломоносов, Бернулли) использовали кинетический способ для вывода уравнения для

давления. При этом они отходили от объяснения тепловых свойств воздуха по той причине, что они были трудные и непонятные.

В начале 19 века же выяснилось, что в этих свойствах имеется некая определенность. Есть сравнительно простые законы, которые воедино свел Клайперон. В этом новом контексте часто упоминается Герапат, как один из отцов-основателей молекулярно-кинетической теории. Он, на самом деле, занимался кинетическим объяснением гравитации. Затем, в 1845 году Уотерстон выступил с замечательным докладом, который, однако, не был опубликован.

Самая главная, центральная работа в этой теме, которая сыграла роль пускового сигнала для бурного развития МКТ – это работа Августа Кренига 1856 года. Именно после ее публикации тепловые процессы стали связывать с хаотическим движением микрочастиц, а температуру – с мерой средней кинетической энергией их движения.

После публикации этой работы выяснилось, что таким молекулярно-кинетическим моделированием занимался и Рудольф Клаузиус. Он пытался разделять надежные результаты термодинамики от гипотетических вещей, поступавших от МКТ. Были совершенно неизвестны ни концентрация частиц в газах, ни расстояния между ними, ни их размеры, ни механизм их взаимодействия.

И все-таки Рудольф Клаузиус решил опубликовать свои труды. Дело в том, что он обнаружил ошибку в представлении, который давал Август Крениг. Согласно последнему,

$$p = \frac{1}{6} \frac{Nmc^2}{V},$$

где c – средняя скорость частиц в каждом потоке. Эта формула Кренига была идеологически схожа с той формулой для давления, которую сейчас выводят в средней школе. Там рассматривают 6 потоков частиц вдоль трех осей координат. В одном потоке будет $N/6$ частиц, так как концентрация частиц у всех потоков одинакова.

Но в правильной формуле коэффициент должен быть не $1/6$, а $1/3$, потому что частицы, которые сталкиваются со стенкой, передают ей двойной импульс, $2mc$. В формуле Кренига этот момент не учитывается, на что обратил внимание Клаузиус.

Стоит отметить два существенных момента, связанных с публикацией работ Клаузиуса. Во-первых, еще у Кренига присутствовала идея использования теории вероятности, однако эта мысль ничем не подкреплялась. Сама теория вероятности возникла еще в 17 веке как теория дискретной вероятности, объясняющая результаты

азартных игр – кости, карты, и так далее. В 18 веке теория вероятности уже имела отношение к социологии и маркетингу. А в начале 19 века, в результате деятельности замечательного математика Гаусса, возникла теория вероятности непрерывно распределенных величин. Поскольку в МКТ рассматривались процессы с большим количеством составляющих элементов, то применение теории вероятности казалось перспективным, хотя пока и не очень понятным. Именно в таком ключе о теории вероятности говорил Крениг.

У Клаузиуса теория вероятности тоже не стала элементом построения новой теории. Но он проводил следующую аналогию. В физике, как и в социологии, можно применить закон больших чисел и прийти к результату

$$\frac{\delta c}{c} \div \frac{1}{\sqrt{N}}$$

Поясним эту формулу. Если в дискретной системе рассмотреть среднеквадратичное отклонение – флуктуацию (δc), разделить ее на среднее значение, то получившееся отношение будет пропорционально корню из числа частиц в -1 степени. Этот результат вам сейчас хорошо знаком, особенно после курса статистической физики.

Однако, Клаузиус обобщал эту формулу и на распределение скоростей, считая, что можно, при достаточно большом количестве частиц, всегда обходиться только средней скоростью. Сейчас мы знаем, что это не так, и что дисперсия в распределении Максвелла в общем случае к нулю не стремится.

Итак, дальше стали работать с исправленной формулой для давления. Само давление измерять умели. Величину Nm/V , то есть, массовую плотность, тоже можно было рассчитать. И если давление разделить на эту массовую плотность, то получится квадрат скорости. И на почве интерпретаций значений скоростей у Клаузиуса возникла дискуссия с голландским физиком, Бейс-Баллотом.

Бейс-Баллот первым воспользовался формулой для давления и получил, что скорость молекулы азота составляет 400 м/с, а молекулы водорода – 1844 м/с. Эти скорости Бейс-Баллот счел гигантскими. Ведь если посмотреть на джентльменов, выпускающих кольца дыма, то легко заметить, что скорость их распространения (даже расплывания) никак не может составлять сотни метров в секунду. Именно в этом состояло возражение Бейс-Баллота.

Клаузиусу пришлось несколько модифицировать свою теорию и ввести идею средней длины свободного пробега. Во второй половине пятидесятых годов более

продвинутая молекулярно-кинетическая теория Клаузиуса использовала концепцию молекулярных столкновений. И с позиции этой теории удалось преодолеть возражения Бейс-Баллота, объяснив распространение дыма диффузией – одним из явлений переноса. Динамика этого явления сильно зависела от длины свободного пробега, которая была очень маленькой.

Вторым моментом, характеризующим тот период, была предтеча теоремы о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Если в 18 веке хотели отделить давление воздуха от его тепловых свойств (так как не удавалось экспериментально обнаружить взаимодействие этих понятий), то в 19 веке понемногу подходили к идее о том, что энергия вращательного движения молекул как-то похожа на энергию поступательного движения.

Наконец, было интересно рассматривать неидеальные системы. Для объяснения движения частиц Клаузиус использовал представление о финитном квазипериодическом тепловом движении в замкнутом объеме. В этом случае можно было воспользоваться известной из механики теоремой вириала, которая возникла еще раньше. И построение систем реальных газов в дальнейшем основывалось именно на этой идее.

Исследования Максвелла по МКТ в 60ые годы 19 века. **Проникновение теории вероятности в физику**

В конце пятидесятих годов к развитию молекулярно-кинетической теории присоединяется Джемс Максвелл. В его деятельности в шестидесятые годы можно выделить два существенных аспекта. Максвелл расширил использование теории вероятности. И если у Клаузиуса использование теории вероятности сводилось, в основном, к аналогиям, то у Максвелла степень проникновения была намного выше.

Одна из работ Максвелла (которая, на самом деле, была докладом в 1859 году) называлась «Пояснения к динамической теории газов». Вторая работа, которая уже была монографией, выпущенной в 1866 году, называлась «Динамическая теория газов». И зачастую, говоря о работах Максвелла, многие люди упоминают именно первую работу, в то время как про вторую забывают. И это не случайно. Дело в том, что «Динамическая теория газов» отличалась большим объемом и наличием огромного количества самых разных формул. Люди, которые эту работу читают, обращают внимание в основном на известное распределение Максвелла, а остальные тяжелые вещи пропускают.

Итак, давайте рассмотрим, как же все-таки теория вероятности проникает в физику. Конечно, азартные игры в физику никак не внедрялись. Но вероятностное описание непрерывных величин, основанное на ряде теорем, доказанных Гауссом и другими математиками в начале 19 века, оказалось очень удобно для построения теории ошибок. Таким образом, впервые теория вероятности в физике стала использоваться для расчета погрешности, в первую очередь, астрономических измерений. Например, функцию ошибок широко использовал замечательный астроном Гершель.

Затем Максвелл, после ознакомления с теорией ошибок, пришел к выводу, что в молекулярно-кинетической теории надо вывести функцию распределения молекул по скоростям. Спустя некоторое время мы обсудим пару нюансов, касающихся этой формулы.

Здесь интересно обратить внимание на следующее. Если взять любую книгу по курсу общей физики, то почти наверняка в ней можно найти вывод распределения Максвелла. В нем используется идея независимости случайных событий. В этом случае, совместная вероятность равна произведению парциальных вероятностей:

$$f(v_x^2)f(v_y^2)f(v_z^2) = f(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$$

Экспонента в распределении Максвелла получается из того, что декартовы компоненты скорости частицы являются независимыми величинами. Решением получившегося функционального уравнения является как раз экспонента.

Обратим внимание на то, что обоснование, которое использовал Максвелл при выводе своей формулы, на самом деле неправильно. При этом его используют во всех учебниках без всяких сомнений. А неправильным его можно считать по той причине, что независимость декартовых компонент скорости частиц, вообще говоря, ни откуда не следует.

Более того, мы знаем, что распределение Максвелла работает и при рассмотрении релятивистской динамики плазмы. В этом случае используют модифицированную формулу, по которой произведение различных компонент уже не образуют сумму. Таким образом, вывод формулы оказывается, внезапно, неправильным.

Такое обстоятельство можно легко объяснить. Уже через шесть лет, в 1866 году, Максвелл использует другой вывод, базирующийся на теоретической физике. Кстати, именно этот вывод приводится в учебниках Иридия Александровича Квасникова. Напомню, что там использовалась другая статистическая независимость – не для отдельной частицы, а для различных частиц. Вводится концепция динамического хаоса,

согласно которой, при рассмотрении двух частиц, которые можно считать невзаимодействующими, можно взять такую двухчастичную функцию распределения, которая будет представлять собой произведение одночастичных функций распределения:

$$f_2(v_1, v_2) = f(v_1)f(v_2);$$

Максвелл пытался вывести именно одночастичные функции распределения. В итоге у него получились известные экспоненты. Их получение основано на рассмотрении столкновения частиц, которые не должны менять двухчастичную функцию распределения:

$$f(v_1)f(v_2) = f(v'_1)f(v'_2)$$

Таким образом, функциональное уравнение для функции распределения принимает другой вид. Рассмотренный баланс обеспечивает стационарность получающегося распределения. Кстати, Больцман позже указал на то, что такой баланс является лишь достаточным условием стационарного распределения Максвелла. А вопросы, касающиеся единственности равновесного распределения и приводящих к нему механизмов, остаются у Максвелла без ответа.

В «Динамической теории хаоса» есть еще одно принципиальное отличие от ранней работы Максвелла. Здесь он вводит модель, которую потом использует и Больцман – модель, описывающую устройство системы взаимодействующих частиц. В первой работе эта система представляла собой, грубо говоря, множество «бильiardных шаров», которые могут сталкиваться между собой. Во второй работе рассматривается последовательный анализ динамики частиц. В подробности я вдаваться не буду, лишь посоветую вам самостоятельно ознакомиться с этим замечательным трудом. Если вкратце, то там рассматриваются частицы, имеющие малый (но не нулевой) размер, которые взаимодействуют на больших расстояниях силами притяжения, которые падают по довольно быстрому закону. Сам Максвелл почему-то предлагает следующий закон взаимодействия:

$$F(r) \sim r^{-5}$$

Интересно, что этот закон произвел большое впечатление на другого отца-основателя молекулярно-кинетической теории – Людвига Больцмана. Судите сами, ведь в то время сами молекулы никто не видел. Соответственно, нельзя было измерить взаимодействие молекул, записать потенциал взаимодействия. Было лишь понятно, что их взаимодействие убывало быстрее, чем r^{-2} .

Максвелл рассмотрел именно -5 степень по той причине, что возникающие при последовательном кинетическом рассмотрении довольно неприятные интегралы упрощаются на два порядка именно при таком законе взаимодействия. Максвелл считал, что между -5, -6, -7 степенями, в принципе, качественной разницы нет. Поэтому он и взял ту степень, которая дает самый простой метод расчета.

Далее, Максвеллу удалось дальше, чем Клаузиусу, продвинуться в расчете уравнений для явлений переноса. При этом ему приходилось использовать метод последовательных приближений, так как само по себе явление, например, диффузии не может иметь место в равновесной системе. В результате Максвеллу удалось получить известные формулы для коэффициентов с третями, которые вы можете встретить в учебнике по общей физике.

Как эти формулы выводятся в современных учебниках? Там применяется некий компромисс между расчетом по методу Клаузиуса (с использованием длины свободного пробега) и попытками обосновать такие расчеты с кинетической точки зрения.

Далее, если вспомнить одну из этих формул, то оказывается, что коэффициент теплопроводности и вязкости не зависит от давления. Такой эффект действительно имеет место, но лишь до той поры, пока длина свободного пробега не сравнится с размерами сосуда. Начиная с такого вакуума, формулы, полученные Клаузиусом и Максвеллом, перестают работать. Но, стоит отметить, что сами вакуумные насосы научились конструировать только во второй половине 19 века.

Я остановился на этом моменте по следующей причине. МКТ и статистическая физика приобрела в научном сообществе весьма своеобразный статус. Возникнув в пятидесятых годах 19 века, она довольно быстро смогла развиваться до серьезной науки. Но при этом, 90% всех результатов позволяли лишь объяснить известные явления. Например, запись закона сохранения механической энергии приводила к первому началу термодинамики. А других серьезных результатов и предсказаний получено не было. Единственным результатом, который получил Максвелл, была как раз вышеупомянутая независимость коэффициента теплопроводности от давления. Именно это «предсказание» в какой-то степени позволяло молекулярно-кинетической теории держаться на плаву. Но как мы дальше увидим, дальнейшее развитие МКТ зачастую носило кризисный характер.

Остановимся на еще одном моменте. Уже в шестидесятые годы начались важные для нас дискуссии между Максвеллом и Вильямом Томсоном. Сам Томсон, вплоть до

смерти в 1906 году, весьма критически относился к теории электромагнитного поля Максвелла, что не мешало ему с большим уважением относиться к самому Максвеллу.

Сами дискуссии, продолжавшиеся с середины шестидесятых до середины семидесятых годов, были посвящены тому, как устроено механическое обоснование МКТ. Споры были вызваны тем, что Томсон, создавая основы термодинамики, обратил внимание на термодинамическую необратимость, которая следует из второго начала термодинамики. Ведь конструкции и Клаузиуса, и Максвелла были системами без трения – их еще можно назвать гамильтоновскими системами, без микроскопической диссипации. Про такие системы мы знаем следующее – они обратимы во времени, их механическое движение принципиально обратимо. В то время как термодинамика устроена так, что в ней имеет место релаксация к равновесию. Таким образом, Томсон указывал на то, что у всех механических моделей имеется вышеописанный недостаток.

Вообще говоря, у молекулярно-кинетической теории был и целый ряд других проблем. Томсон, будучи атомистом, не только критиковал МКТ, но и предлагал свои идеи. Он рассматривал атом как сложную конструкцию, как некий вихрь. С другой стороны, из МКТ следовала теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Но вихревая модель атома подразумевает континуум степеней свободы. Откуда же тогда берется конечная теплоемкость?

Дискуссии, посвященные таким вопросам, были достаточно сложными. В одной из них возникла идея «демона Максвелла». Но к вопросам о необратимости мы еще вернемся.

Людвиг Больцман (1844-1906). Создание статистической физики

Перейдем к обсуждению деятельности второго отца-основателя статистической физики – к Людвигу Больцману.

Ранний период деятельности Больцмана

В основном, Больцман трудился в Венском университете, который до этого окончил. В 1866 году он писал что-то вроде дипломной работы. Читая учебник Спасского, вы увидите, что там как-то критически описана ранняя стадия деятельности Больцмана. Он считал, что тепловое движение суть квазипериодический процесс, и его нужно рассматривать в духе анализа квазипериодических процессов в механике. Отсюда и надо было пытаться вывести обоснование термодинамики. Я бы здесь пересмотрел критическую позицию Бориса Ивановича на такие взгляды Больцмана.

Итак, Больцман, будучи студентом вашего возраста, пишет диплом. И в этой дипломной работе 1866 года содержится гениальное открытие, которое часто недооценивается историками физики. Возможно, студенты с ядерного отделения встречали такое понятие, как *адиабатический инвариант*. Например, при рассмотрении движения частицы в магнитном поле Земли. Оказывается, что это понятие впервые в теоретическую науку внес Больцман в своей дипломной работе.

Позволю себе лирическое отступление, связанное плохим пониманием реального вклада Больцмана в развитие статистической физики. В годы моего студенчества были изданы переводы трудов Больцмана по статистической физике. Эти труды представляли собой набор статей, изначально опубликованных на немецком языке (1868-1879). И в предисловии была статья издателя, известного человека, который всю жизнь занимался историей физики. После прочтения предисловия становилось понятно, что написавший его человек не разобрался в том, что у Больцмана написано и получено. Скорее всего, потому, что сам материал весьма сложный.

В любом случае, предисловие состояло из набора штампов, которые вам самим, вероятно, хорошо известны. Когда мы вспоминаем Больцмана, у нас в голове обычно появляется дополнение распределения Максвелла больцмановским фактором, и другие вещи, с этой темой слабо связанные – закон Стефана-Больцмана, например. А при разговоре о равновесной статистической физике в голове возникают образы, связанные с Гиббсом. И реальная ситуация такова, что всё, на самом деле, было наоборот.

Практически всё, что вы учили в статистической физике, было сконцентрировано в замечательных трудах Больцмана. Именно в них формируется общее описание равновесия. Хотя надо признать, что оно было достаточно специфическим для той эпохи.

Утверждение и детализация МКТ Максвелла

Больцман, познакомившись с «Динамической теорией газов» Максвелла, решил, что МКТ надо обобщить, сделав ее более фундаментальной. Надо рассмотреть частные вопросы, которые отсутствовали в трудах Максвелла. Как мы видим, сам Максвелл имел своеобразный подход, заключающийся в максвелловских молекулах.

Здесь Больцман вводит новое понятие, которое затем сыграло принципиальную роль в его трудах – многоатомные молекулы. Сегодня мы под многоатомными молекулами подразумеваем несколько другие вещи, конечно. В то время были неизвестны ни размеры молекул, ни их свойства. Тем не менее, у Больцмана отсутствовали какие-то абстрактные представления.

Он рассматривал потенциальные силы между молекулами в декартовых координатах. При этом молекулы обладали определенной энергией. Полную энергию молекулы Больцман обозначала как $W(r_1, v_1, r_2, v_2, \dots, r_n, v_n)$. В эту полную энергию входили как зависящие от скорости кинетические энергии составляющих молекулу атомов, так и потенциальные энергии парного взаимодействия. Буквой n обозначалось число атомов в молекуле.

Больцман выяснил, что если молекула движется без столкновения, то, с точки зрения метода функций распределения (описывающих равновесное состояние), мы можем ввести некоторое требование стационарности. Если конкретнее, то функция распределения должна быть функцией от интегралов движения.

В момент столкновения происходит обмен интегралами движения – энергией, импульсом, моментом импульса. И многоатомные молекулы при этом ставятся вместо одноатомных объектов Максвелла. Этот момент важен, так как из него следовали несколько замечательных следствий.

Во-первых, такой подход позволял обобщить рассматриваемые системы, что само по себе неплохо. Во-вторых, Больцман рассматривал разные подстановки задач. Например, он рассмотрел изолированную систему. Сейчас для такой системы мы можем использовать микроканоническое распределение, рассмотрев тонкий (по значениям энергии) слой:

$$W_0 \leq W(r_1, v_1, r_2, v_2, \dots, r_N, v_N) \leq W_0 + \delta W$$

В таком случае, если использовать идею равновероятности различных значений энергии, то можно снова вывести распределение Максвелла.

Равновесие неидеальных систем и твердых тел

Далее, встал вопрос о том, как описывать твердые тела и жидкости. Ведь почему-то в связи с Больцманом вспоминают только газы, что совершенно неправильно. Именно Больцман смог ответить на вопрос, как описывать равновесия твердых тел. Кроме того, он смог косвенно вывести закон Дюлонга и Пти. Как же Больцман подходил к рассмотрению твердых тел?

Оказывается, что n в энергии молекулы никак не связано с конкретным числом. Быть может, n – гигантское число, а объекты рассмотрения представляет собой макроскопические тела, которые как-то редко соударяются друг с другом, при этом обмениваясь энергией и импульсом.

Если внимательно изучить труда Больцмана, то становится видно, что именно в этом месте у него возникает идея ансамбля. Под ансамблем подразумевается

множество экземпляров одной системы, между собой не взаимодействующие. Самыми первыми ансамблями у Больцмана были именно эти макроскопические «молекулы».

В ранних работах конца шестидесятых – начала семидесятых годов Больцман рассматривал среднее без теории вероятности – как среднее по времени, используя время наблюдения и время пребывания частицы в некоторой области фазового пространства, которое Больцман же и ввел в рассмотрение. Но стоит отметить, что Больцман не выполнял обобщения на абстрактную гамильтоновскую механику. Именно поэтому в ранних работах Больцман сделал как бы «шаг назад», по сравнению с работами Максвелла. Свою теорию Больцман воспринимал как приближенный метод расчета, аналог теории возмущения, только в МКТ. Такую же роль играли функции распределения.

Одним из полученных результатов была известная формула для внешнего потенциального поля. Причем стоит обратить внимание на одну вещь в формуле ниже:

$$f(\mathbf{r}, \mathbf{v}) = A \exp \left(-\beta \left(\frac{mv^2}{2} + U(\mathbf{r}) \right) \right)$$

Сейчас в этой формуле вместо β пишут $1/kT$, где k – постоянная Больцмана. Но тогда ни Максвелл, ни Больцман не могли ничего написать, кроме как βW . Они понимали, что коэффициент β пропорционален $1/T$, где T – абсолютная температура, но коэффициент этой пропорциональности было невозможно определить, потому что было неизвестным число Авогадро.

И вообще, тогда еще не могли определить число частиц в системе. Да, были косвенные методы оценки такого числа, но они давали приближенные результаты, далекие от тех, которыми мы сейчас пользуемся. Само по себе число Авогадро было получено только в 1900 году, в результате знаменитой работы Планка по равновесному излучению. Лишь после этого можно было конкретно оценивать коэффициенты в функции распределения.

Больцман также получил формулу, описывающую распределение системы, находящейся в термостате:

$$f(\mathbf{r}_1, \mathbf{v}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{r}_n, \mathbf{v}_n) = A_0 \exp[-\beta W(\mathbf{r}_1, \mathbf{v}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{r}_n, \mathbf{v}_n)]$$

Эту формулу сейчас мы называем каноническим распределением.

В это же время возникает идея описания ансамбля через многоатомные молекулы и понятие фазовых средних.

Также надо обратить внимание, что вплоть до 1873 года Больцман считал, что метод функций распределения является приближенным решением механической модели. В таком подходе роль теории вероятности сводилась к приемам, позволяющим получить решение (по аналогии с теорией возмущения в механике). С этой точки зрения у Максвелла был более фундаментальный подход, который сразу считал, что теория вероятности и статистическая физика есть новые, ключевые науки для развития МКТ.

Релаксация к состоянию равновесия. Согласование с МКТ и вывод второго начала термодинамики

Ситуация начала меняться в 1873 году. Относительно недавно вы сдавали экзамен по статистической физике, и формулу ниже должны неплохо помнить:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\mathbf{F}}{m} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{p}} = \int (f(\mathbf{p})f(\mathbf{p}_1) - f(\mathbf{p}')f(\mathbf{p}'_1)) \Psi(\mathbf{p}, \mathbf{p}_1, \rho) d\mathbf{p}_1 d\rho$$

Это кинетическое уравнение, носящее имя Больцмана, было его самым большим достижением, которое многие неправильно оценивают. Фактически, написав это уравнение, Больцман создал новый раздел теоретической физики.

Больцман вывел эту формулу, рассматривая вопрос, которого Максвелл совершенно не касался – обоснование второго начала термодинамики. Максвелл, конечно, писал уравнение для равновесного распределения в каком-то частном случае, но оно было лишь необходимым, то есть система стремилась к этому состоянию. Но было непонятно, как этот процесс «стремления» описывается во времени.

Больцман же, во-первых, решил, что функция распределения должна быть функцией от времени, помимо других 6 переменных. В правой части уравнения Больцмана записан тот баланс, который использовал еще Максвелл в «Динамической теории газов». Вот только Максвелл сразу рассматривал равновесное состояние, приравняв этот баланс нулю. А уравнение Больцмана описывает именно эволюцию функций распределения. Если столкновения отсутствуют, то слева получается одночастичное уравнение Лиувилля, описывающее динамику системы под действием внешней силы F .

Безусловно, стоит отметить огромную роль кинетического уравнения Больцмана в развитии физики. Но тут возникла одна проблема, которую сам Больцман решить не смог. Он смог только доказать H-теорему, которая заключается в том, что функция H

$$H(t) = \int f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) \ln f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) d^3r d^3v$$

такова, что ее производная по времени меньше или равна нулю, $dH/dt \leq 0$. И эту функцию сейчас связывают с энтропией, $H = -S$.

Больцман тоже интуитивно имел это в виду, но из этой теоремы следует, что система должна стремиться к минимуму функции $H(t)$. А в состоянии равновесия, когда $dH/dt = 0$, функция распределения оказывается совпадающей с распределением Максвелла-Больцмана.

С этой точки зрения, Больцману удалось решить проблему Максвелла и доказать необходимость установления равновесия. Но при этом возникает парадокс Лoшмидта (1874), который заключается в следующем. Если уравнение Больцмана является следствием уравнений механики, то система получалась бездиссипативной. И при замене скоростей на обратные получится то же самое, что и при замене $t \rightarrow -t$. Как следствие, система должна эволюционировать по некоторой траектории в обратном направлении. И объяснение второго начала термодинамики Н-теоремой является неправильным.

Следующая работа Больцмана вышла в свет только в 1877 году. И за 4 года, предшествовавшие этой публикации, Больцман радикально изменил свою позицию. Он пришел к окончательному выводу, что все дело в фундаментальном значении теории вероятности (то есть, перешел на те позиции, которые исходно занимал Максвелл).

Мы сейчас понимаем, что само произведение функций распределения в уравнении Больцмана никак не ввести без теории вероятности. По этой причине кинетическое уравнение Больцмана является больше статистическим уравнением, а не механическим. Поэтому Больцман решил использовать другой подход, который оказался невольным продолжением метода, который применял за 3 года до этого Вильям Томсон.

В 1874 году Томсон опубликовал труд по статистической интерпретации второго начала термодинамики. Но в этом труде рассматривался только частный случай. И если Больцман рассматривал равновесие газов со столкновениями, то Томсон изучил более простую вещь.

Вспомните, откуда вы брали на 1 курсе равновесное распределение? Никакого фазового пространства вы не использовали. Вместо этого вы рассматривали обычное биномиальное распределение в каком-нибудь ящике. Так вот, эту задачу впервые придумал и рассмотрел в своем труде именно Томсон. Он ввел понятия микро- и макросостояний. Вероятность макросостояния он рассчитывал, просто подсчитывая

число микросостояний, которые реализуют макросостояния. При этом выяснилось, что некоторые макросостояния более вероятны, чем другие.

Отсюда можно увидеть эволюцию не механическую, а вероятностную. Томсон сразу предложил объяснение того, с чем это можно быть связано. Он считал, что молекулярные системы имеют неустойчивую динамику. Малейшее внешнее воздействие дают непредсказуемое микроразвитие.

Кстати, в наше время состояние проблемы объяснения необратимости не так далеко ушло от времен Больцмана. Полного доказательство решения проблемы термодинамической обратимости до сих пор нет, честно говоря.

Тем не менее, Больцман в своей знаменитой работе, длинное название которой я не привожу, вводит понятие вероятности состояния в фазовом пространстве, исходя из равновероятности различных микроскопических состояний, фиксированности числа частиц и фиксированности полной энергии в ящике. При таком рассмотрении можно получить, что равновесная вероятность в точке максимума совпадает с известным выражением для энтропии газа. Сейчас мы пишем формулу

$$S = k \ln W,$$

где W – термодинамическая вероятность макроскопического состояния. В то время, конечно, постоянной Больцмана быть не могло. Поэтому Больцман говорил о пропорциональности энтропии и логарифма термодинамической вероятности.

Таким образом, эволюция системы происходит от менее вероятного состояния к более вероятному. Именно в этом состояла суть второго начала термодинамики. А формула с современными обозначениями, введенными Планком, написана на могиле Больцмана.

Ситуация конца семидесятых – начала девяностых годов 19 века.

Кризисное развитие МКТ

Нам очень важно осознать, что дальнейшее развитие теории сопровождалось некоторыми кризисами. Да, мы видим, что та статистическая физика, которую вы проходите на 4 курсе, уже возникла к тому времени практически в полной форме. Но поначалу из этого ничего хорошего не получилась. Вся эта теория в основном развивалась только двумя пропагандистами.

К тому же, у теории имеется масса проблем. Во-первых, количество удачных предсказаний было довольно ограниченным. Их несложно перечислить. Переоткрытие

закона Дюлонга и Пти, который уже был к тому времени известен, объяснение независимости теплопроводности от давления. Собственно, на этом всё. Остальные результаты, полученные на бумаге, оставались достаточно непонятными.

И пусть бы они были просто непонятными – их можно было бы проверить позже. Но в теории Максвелла и Больцмана накопилось большое количество внутренних противоречий. А внутренних противоречий, или парадоксов, в хорошей теории быть не должно. Такое стремление было одним из стимулов к развитию физической науки.

Парадокс Лошмидта мы уже обсудили. И вроде бы, Больцману удалось его разрешить. Но, на самом деле, это объяснение было неправильным. Больцман получил уравнение, описывающее кинетику функции распределения. Но решить его в то время было просто невозможно.

Далее, в девяностые годы в английском журнале Nature проходила дискуссия, в основном посвященная парадоксу Цермело-Пуанкаре. Он заключался в следующем. В девяностые годы в классической механике появилась теорема Пуанкаре. Согласно ей, у финитной системы с конечным числом степеней свободы есть некоторое время возврата, спустя которое система возвращается в ту точку фазового пространства, в которой она уже была. Таким образом, движение такой системы является квазипериодическим. Пуанкаре не говорил о том, как посчитать это самое время возврата, но доказал его существование. Цермело воспользовался результатом теоремы Пуанкаре и применил ее к результатам Больцмана. Согласно им, исходно неравновесная система рано или поздно приходит к равновесию и обратно не возвращается никогда, что противоречит теореме Пуанкаре.

Дискуссии на эту тему не были особо эффективными. У Больцмана не имелось хороших ответов на такие претензии. Он говорил о том, что эволюция происходит в среднем, что вероятность больших флуктуаций очень мала, и так далее.

Следующей проблемой была недооценка отцами-основателями теории возможности экспериментальной проверки теории. Сейчас статистическую физику используют как для расчета неравновесных систем, так и для расчета флуктуаций в равновесной системе, которые нельзя было рассчитать с помощью термодинамики. Но Больцман с Максвеллом все еще не знали числа Авогадро, и поэтому они недооценили величину рассчитываемых флуктуаций. И Максвелл, и Больцман, считали, что невозможно было измерить напрямую флуктуации в рамках экспериментальных методов того времени.

Наконец, в те же годы имела место философски-методологическая критика. На самом первом занятии мы касались этого момента – это был яркий пример

отрицательного влияния философской методологии. В то время в Вене трудился приятель и коллега Больцмана, Эрнст Мах. Мы вспоминали последователей Маха, которые придерживались философии эмпириокритицизма и считали, что главная задача философии заключается в оптимизации физических методов. Такой подход был эффективен в отношении ньютоновской механики – именно последователи Маха ввели понятие инерциальной системы отсчета, обосновали необходимость независимости силы от ускорения, и так далее.

Тем не менее, эмпириокритический подход Маха говорил о том, что теория вообще не должна содержать в себе вещей, которые нельзя экспериментально проверить. И теория Максвелла и Больцмана не удовлетворяла такому позитивистскому анализу.

Стоит упомянуть известного химика Оствальда, который тоже критиковал Максвелла и Больцмана. Причем Оствальд исходил из факта существования термодинамики – замечательной науки, которая замечательно стыкуется с экспериментальными исследованиями. А МКТ использует подход, который уводит нас к вообще экспериментально ненаблюдаемым понятиям.

Больцман долгое время не мог получить новых результатов, в то время как критическое давление на него все росло и росло.

Статистическая физика Джозайи Уилларда Гиббса (1902)

Но в это время появляется статистическая физика Джозайи Уилларда Гиббса. И теперь мы понимаем, почему она была написана именно так. Гиббс честно пишет, что он лишь продолжает замечательное направление Максвелла и Больцмана. Но при этом его работы ценны тем, что он ушел от конкретных моделей устройства тел – газа, жидкости и твердых тел. У него нет системы материальных точек, обладающих кинетической энергией, и взаимодействующих потенциальными силами. Зато у него есть абстрактный гамильтоновский подход, который и был стимулирован критикой Больцмана. В результате методы равновесной статистической физики после работ Гиббса получили существенное развитие.

Далее, у Гиббса не было ничего, что походило бы на релаксацию. Рассматривалось только состояние равновесие, что с определенной точки зрения являлось шагом назад по сравнению с работами Больцмана.

Дальнейшее развитие статистической физики

Ситуация начала резко меняться в начале 20 века. Во-первых, еще раньше имело место использование метода Больцмана. Именно его использует Планк в своем втором

труде (октябрь 1900), посвященном выводу спектра равновесного теплового излучения. Правда, в двадцатые годы, когда стали разбираться с различными статистическими подходами, поняли, что у Планка получился немного отличный от Максвелла и Больцмана результат.

Далее, в 1900 году Планком были получены численные значения постоянной Авогадро и постоянной, которую Планк назвал в честь Больцмана.

В 1904 году выходит статья Смолуховского, в которой обращено внимание на возможность неравномерности распределения молекул газа.

Наконец, в 1905-1906 году Эйнштейн провел свои знаменитые исследования броуновского движения. Известно, что он получил Нобелевскую премию именно за эти труды. К тому времени броуновское движение было уже известно как 80 лет, но объяснять его не умели. Эйнштейн же воспользовался теорией Максвелла-Больцмана для объяснения движения броуновских частиц. У него получились замечательные результаты, известные как формулы Эйнштейна. Например, изменение среднего квадрата координаты броуновской частицы с течением времени.

В 1908-1909 годах эти соотношения были проверены Жаном Перреном. Интересно, что через эти опыты удалось еще раз выйти на число Авогадро и постоянную Больцмана. Полученные значения флуктуаций оказались в точном соответствии с предсказанием теории Максвелла-Больцмана.

Таким образом, произошел перелом в восприятии МКТ, который был связан с вышеперечисленными событиями. Проблемы и парадоксы никуда не делись (некоторые из них – до сих пор не разрешены), но уже никто не мог отмахнуться от этой теории. К тому же, в это время атомы и молекулы перестали быть какими-то виртуальными объектами, а получили весьма реально экспериментальное подтверждение.

Давайте напоследок обсудим один момент, который часто плохо освещается. Вы наверняка слышали об электронной теории проводимости металлов Друде-Лоренца. Так вот, на самом деле Друде с Лоренцом зря объединяют. Первый, после открытия электрона, попытался качественно объяснить проводимость металла по аналогии с диффузией газа, в духе Клаузиуса. А Лоренц получил совсем другой результат. В 1913 году он тоже рассмотрел диффузию легкого газа в тяжелом. Но при этом он использовал уравнение Больцмана. Более того, он впервые в истории получил приближенное решение этого уравнения. И этот гениальный шаг многими недооценивается.

Ведь само уравнение Больцмана, будучи важнейшим методом кинетической теории, появилось еще в 1873 году. И никто, включая самого Больцмана, не мог его решить. Лоренцу же удалось получить решение, пусть и приближенное.

Дальнейшее развитие физической кинетики

Только во второй половине тридцатых годов 20 века удалось приближенно решить уравнение Больцмана в общем виде, используя метод Гильберта-Чепмена-Энскога. На кафедре теоретической физики был спецкурс, на котором Леонид Стефанович Кузьменков рассказывал про этот метод. В этом методе получается 5-моментное приближение к вязкой гидродинамике. Кстати, оказывается, что Больцман был неправ в описании эволюции газа. Если помните, то он сразу и навсегда вводил некую стохастику. На самом деле, в участках системы сначала образуется локальное распределение Максвелла, а в дальнейшем эволюция происходит по уравнениям вязкой гидродинамики – уравнениям Навье-Стокса.

Затем, оказалось, что есть системы с дальнодействием – гравитирующим или кулоновским (плазма). В 1938 году Власов Анатолий Александрович, сотрудник нашего факультета, публикует статью «О вибрационных свойствах электронного газа».

Наконец, в 1945 году Боголюбов Николай Николаевич разобрался в стадиях эволюции микроскопических систем. Согласно его иерархии, сначала идет кинетическая стадия, затем гидродинамическая.

Лекция 10. Электронная теория Лоренца. Возникновение СТО

План лекции:

Электронная теория Лоренца.

Деятельность Гендрика Антона Лоренца (1853-1928). Возникновение электронной теории:

- Лоренц – первый чистый теоретик в физике. Вступил в науку в 1875 году.
- Фон деятельности Лоренца – опыт Роуланда в 1876 году. Макроскопическое движение заряда эквивалентно электрическому току.
- Линия дискретных зарядов. Вебер, Клаузиус, Лоренц.
- Соединение этой линии с концепцией электромагнитного поля Максвелла.
- Микроскопическое и макроскопическое поле, поляризация среды.
- Механика частиц в поле под воздействием силы Лоренца.

$$m\dot{\mathbf{v}} = q(\mathbf{E} + [\mathbf{v}, \mathbf{B}])$$

- Система частицы-поле. Самосогласованное поле. Нелинейная электродинамика.

Сферы применения (ионной) электронной теории Лоренца:

- Связь диэлектрической проницаемости вещества и его плотности (формула Лорентц-Лоренца). Квазиупругие силы и дисперсия света – молекулярная оптика, в т.ч. объяснение эффекта Фарадея и **магнитного эффекта Керра** (1877, изменение поляризации света при отражении от полюсов магнита).
- Предсказание эффекта Питера Зеемана (1896, 1902-Нобелевская премия).
- Электродинамика движущихся тел. Концепция неподвижного эфира + объяснение эффектов относительного движения источников света/среды/приемников света + объяснение отсутствия эффектов движения системы отсчета (опыты Майкельсона и Майкельсона-Морли).
- Электронная теория проводимости металлов.
 - 1900 – для объяснения проводимости Друде ввел концепция электронного газа и длины свободного пробега электронов.
 - Лоренц в 1902-1913 году применил кинетическую теорию Больцмана и получил приближенное решение кинетического уравнения Больцмана при рассмотрении диффузии легкого газа в тяжелом.

Открытие электрона:

- 1855 – Гейслер изобрел ртутный вакуумный насос. Использовал для исследования электрического разряда в вакуумных трубках.

- 1870 – Крукс, для объяснения явления катодных лучей, предложил идею свечения остаточного газа.
- Гольдштейн показал, что такое объяснение не годится, поскольку длина свободного пробега молекул остаточного газа слишком велика.
- 1883 – Герц, отклонение катодных лучей в магнитном поле.
- 1895 – Перрен, накопление отрицательного заряда в цилиндре.
- 1894-1897 – Джозеф Джон Томсон:
 - Огромная скорость катодных лучей.
 - Детальное исследование отклонения катодных лучей в магнитном поле и в скрещенных электрическом и магнитном полях. Определение отношения e/m .
 - Измерение заряда частицы капельным методом.
- Проблема электромагнитной массы частицы (Дж.Дж.Томсон, Фицджеральд, Хэвисайд).

Электродинамика движущихся тел:

- Уравнения Максвелла с учетом относительного движения источников/приемников поля, а также весомой среды - $(v/c)^1$
 - Идея Максвелла о преобразовании полей для объяснения относительности в явлении электромагнитной индукции:

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \frac{1}{c}[\mathbf{v}, \mathbf{B}]$$

- Для объяснения опыта Физо – частичное «увлечение эфира» - Лоренц вводит дополнительно идею местного времени:

$$t' = t - \frac{vx}{c^2}$$

- Влияние движения системы отсчета на электромагнитные явления - $(v/c)^2$
 - Герц пытался спасти инвариантность уравнений Максвелла заменой (полное увлечение эфира):

$$\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla)$$

- 1887-1892 – опыт Майкельсона и Морли. Отсутствие наблюдаемого эффекта.

Анри Пуанкаре и электронная теория Лоренца:

- В 1904 году Анри Пуанкаре вводит в контекст электронной теории *принцип относительности* как постоянство законов природы для неподвижного и движущегося наблюдателя. Также он вводит форм-инвариантность законов и необходимость пересмотра законов динамики частиц. Никакая скорость частиц не должна превышать скорости света.

- 1905 год – работа Пуанкаре «О динамике электрона»:
 - Уравнения Максвелла + принцип относительности.
 - Групповой характер преобразований (\mathbf{r}, t) , (\mathbf{E}, \mathbf{H}) .
 - Инварианты:

$$r^2 - c^2 t^2, \quad (\mathbf{E}, \mathbf{H}), \quad E^2 - H^2$$

- Новое уравнение динамики электрона:

$$\frac{d}{dt} \frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = e \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{v}, \mathbf{B}] \right)$$

Альберт Эйнштейн (1879-1955) и возникновение СТО

1905 год – «К электродинамике движущихся тел»:

- В этом же году опубликовал идею фотона (теория фотоэффекта) – ограниченная применимость уравнений Максвелла.
- Новые пространственно-временные соотношения.
- Не знал работы Лоренца и Пуанкаре 1900-1904 годов.
- Постулаты Эйнштейна – принцип относительности и принцип постоянства скорости света в пустоте.
- Важнейшая (первая) - кинематическая - часть работы содержит определение одновременности и уточняет метод измерения размеров тел и интервалов времени. Вывод – относительность длины и одновременности, замедление хода движущихся часов.
- Вторая - электромагнитная - часть не так продвинута, но содержит важнейшую демонстрацию одинаковости преобразования частоты и энергии в СТО и содержит динамику слабо ускоренных частиц.

Механика специальной теории относительности:

- 1906 – Планк, обобщение динамики отдельной частиц. Импульс, энергия, функции Лагранжа и Гамильтона для релятивистской частицы.
- 1909 – Льюис и Толмен, анализ соударения релятивистских частиц в духе Гюйгенса – из преобразований Лоренца + симметрии соударений.
- Релятивистская связь массы и энергии: Пуанкаре-Эйнштейн-Планк.

Инварианты СТО, геометрия пространства-времени:

- Связь группы преобразований и геометрии – новая геометрия пространства-времени СТО (псевдоевклидова геометрия). 4-мерный «мир» Германа Минковского (1908). Ковариантность уравнений, описывающих физические законы.
- Новая теория – всего лишь замена старых инвариантов на новые. Никакого философского релятивизма.

Признание СТО:

- Открытие мезонов в 1937 году. В 1941 году показано, что их время жизни зависит от скорости в соответствии с СТО.

Электронная теория Лоренца

Сегодня поговорим об электронной теории Лоренца и возникновении специальной теории относительности. Мы будем пытаться сочетать логический подход с хронологическим изложением. Как и в некоторых местах до этого, я буду кое-где смещать акценты нашего внимания, по сравнению с учебниками. При этом давайте обратим внимание на следующее. Учебник Бориса Ивановича Спасского, рекомендованный вам в качестве основного, писался в шестидесятые годы 20 века. Сам Борис Иванович, как исследователь, формировался еще перед Второй Мировой Войной. В то время казалось, что специальная теория относительности является полным переворотом в физике. Как следствие, основное внимание уделялось вопросам, связанным с релятивизмом, выбором системы отсчета как в механике, так и в электродинамике и в других разделах физики. В наше время эти акценты несколько уравнились, а ваше внимание хочется обратить на другие вещи.

Деятельность Гендрика Антона Лоренца (1853-1928). Возникновение электронной теории.

Прежде всего, рассмотрим деятельность Генриха Антона Лоренца. Возникновение электронной теории Лоренца во многих случаях рассматривалось как этап, предшествовавший теории относительности. На самом деле, роль и положение, как электронной теории, так и самого Лоренца, в наше время должна освещаться по-другому.

Отметим один косвенный, но любопытный момент. Лоренц был первым чистым теоретиком в физике. Его деятельность сложилась таким образом, что первую кафедру теоретической физики в Лейденском университете возглавил именно он. Эта черта, несмотря на ее формальность, все же будет некоторым любопытна.

Фон для деятельности Лоренца был обусловлен опытом Роуланда, который мы уже обсуждали. Напомню, что Роуланд в своем эксперименте доказал, что конвективный ток (то есть, ток, возникающий при переносе заряженного тела) по своему магнитному действию неотличим от тока проводимости. Таким образом, Роуланд подтвердил те предположения, которые лежали в основе электродинамике Вебера, и заодно повлиял на позицию Генриха Антона Лоренца.

Обобщая вклад самого Лоренца, и обсуждая место его электронной теории в истории физики, нужно иметь в виду, что современное изложение электродинамики состоит из двух частей – электродинамики вакуума и электродинамики сплошных сред. Основные положения электродинамики сплошной среды заключаются во введении свободных и связанных зарядов, поляризации, ее связи со смещением связанных зарядов, а также микроскопического и макроскопического поля.

Такое изложение, оказывается, наследует ключевые идеи Лоренца. Если об этом забывать, то современные основы электродинамики оказываются наследованными лишь от Максвелла, что, вообще говоря, неверно. Лоренц, конечно, воспользовался уравнениями Максвелла для описания своих макроскопических полей. Но при этом он существенно видоизменил ее.

Напомню вам, что в электродинамике Максвелла была одна особенность – в ней материальные уравнения вводились на равных с остальными фундаментальными уравнениями. Более того, сам по себе ток у Максвелла рассматривался как следствие из дифференциального закона Ома. Его настоящая природа была Максвеллу неизвестна.

Параллельно шло развитие «электрического атомизма». Он был повторно введен в оборот Вебером в его теории. Затем это продолжалось в трудах Рудольфа Клаузиуса, который активно занимался диэлектриками и поляризацией диэлектриков. Он, с одной стороны, рассматривал поляризацию отдельных молекул, а с другой стороны, пользовался понятиями скалярного и векторного потенциала, имеющие под собой полевую интерпретацию.

Главная заслуга Лоренца состоит в том, что он соединил эти два направления. Он, сохраняя дискретность зарядов, предположил, что взаимодействие происходит через электромагнитное поле, для описания которого хорошо подходит теория Максвелла.

Далее, снова упомянем введение микроскопических и макроскопических полей. Вы не так давно учили электродинамику и должны помнить, как во второй части курса вводились микро- и макроскопические поля.

Но эту тему можно еще немного развить. Дело в том, что семидесятые и восьмидесятые годы 19 века являлись эпохой существенного развития другой микроскопической модели – статистической физики Максвелла-Больцмана, с которой Лоренц очень внимательно ознакомился. Получается, что Максвелл параллельно развивал как теорию электромагнитного поля, так и молекулярно-кинетическую теорию, в которой считалось, что отдельные атомы и молекулы взаимодействуют дальним действием (максвелловские молекулы). И именно у Лоренца впервые эти два подхода в какой-то степени состыковались.

В теории Лоренца все это взаимодействие дополнялось механикой частиц – частица изменяет свое состояние движения под действием электромагнитного поля. Существенной частью теории становится уравнение динамики (с силой Лоренца):

$$m\dot{\mathbf{v}} = q(\mathbf{E} + [\mathbf{v}, \mathbf{B}])$$

Таким образом, имеется воздействие электромагнитного поля на частицу. Но, так как поле само создается частицами, то возникает идея самосогласованного электромагнитного поля. Эта идея, кстати, сыграло впоследствии огромную роль в развитии, например, физики плазмы.

Возникают системы «частицы-поле». С одной стороны у нас есть дискретные частицы с конечным числом степеней свободы, а с другой стороны – континуальный образ электромагнитного поля.

Есть еще один момент, который отличает подход Лоренца от подхода Максвелла. Имеется в виду возникновение нелинейности. Обратите внимание, что теория Максвелла линейна в принципе. Ведь, во-первых, в ней отсутствует излучение электромагнитных волн (с этим разобрался, напомним, только Герц). Во-вторых, сама система уравнений Максвелла получалась линейной. Конечно, ее проще решать. Но Лоренц, анализируя конструкцию «частицы-поле», приходит к ситуации, когда появляется нелинейная электродинамика. В конце 19 века на такие результаты не очень активно обращали внимание, но такое отношение кардинально изменилось впоследствии.

Сферы применения электронной теории Лоренца

Обсудим сферы применения электронной теории Лоренца и связанные с ней последствия, которые имели место.

В первую очередь, надо упомянуть молекулярную оптику. Именно здесь Лоренц получил свой первый значимый результат. Вы наверняка сталкивались с формулой Лорентц-Лоренца – она описывает влияние плотности вещества на диэлектрическую проницаемость среды и показатель преломления. Эта формула выводилась Лорентцом параллельно из соображений механической модели оптического эфира с дискретными частицами. Лоренц же получил эту формулу с помощью своей электронной теории.

Сделаем еще одно существенное замечание. Волновая оптика, активно развивавшаяся после достижений Юнга и Френеля, предполагала эфир как упругую среду. Более того, развитие волновой оптики с начала 19 века показало замечательный результат. Оказалось, что при наличии линейной упругой среды возникали проблемы – непонятно, куда было девать продольную волну, и так далее. Но, помимо этого, такая

теория не могла предсказать дисперсию, прекрасно на опыте наблюдаемую. И еще в двадцатые годы 19 века Коши понял, что для введения дисперсии очень полезной оказывается идея наличия каких-то дискретностей в сплошной упругой среде.

На самом деле, весьма нелегко было найти те аспекты, которые могли бы сразу принципиально модифицировать оптические закономерности с учетом электродинамики Максвелла.

Далее, отметим объяснение эффектов Фарадея и Керра. Если о первом эффекте мы уже говорили, то о магнитном эффекте Керра еще нет. Напомню, что он заключается в изменении поляризации света при его отражении от полюсов магнита.

На самом деле, в ранний период деятельности Лоренца (конец восьмидесятых – начало девяностых годов) электронная теория Лоренца носила другое название – она называлась ионной теорией. Ведь сам электрон был официально открыт в 1897 году. Поэтому поначалу Лоренц рассматривал в своей работе именно ионы. С точки зрения оптики, атомы и молекулы представляли собой диполь – связанный квазиупругой силой положительный и отрицательный заряд.

Затем, Лоренц, фактически, предсказал эффект Зеемана. Обычно этот эффект упоминается через запятую с эффектом Штарка и прочими эффектами. Лоренц заранее показал, что атом, который колеблется в постоянном магнитном поле, будет вдоль направления колебаний переизлучать электромагнитную волну с неизменной частотой колебания. А в поперечной плоскости будут излучаться две компоненты со смещенной частотой. Возникновение таких компонент следовало из теории Лоренца, и Зееман, на самом деле, этот эффект искал целенаправленно (и нашел в 1896 году – нормальный эффект Зеемана в натрии).

Причем из курса атомной физики вы знаете, что нормальный эффект Зеемана встречается намного реже, чем аномальный эффект. Поэтому тот факт, что Питер Зееман так быстро наткнулся на то, что искал, является довольно удивительным. Более того, он смог его объяснить. А из эффекта Зеемана можно было получить отношение заряда колеблющейся частицы к ее массе. Оказалось, что это отношение очень большое. Таким образом, было показано, что в оптическом смещении участвует довольно странная частица.

Если вы посмотрите на дату, то увидите, что Зееман провел свои расчеты за год до открытия электрона. В 1897 году Джозеф Томпсон обнаружил катодные лучи в совершенно другом эксперименте. Выяснилось, что отношение заряда к массе там такое же, что и в эффекте Зеемана. Такое сочетание, во-первых, сыграло серьезную роль в утверждении концепции электрона, а во-вторых, поместило электрон, как

оптическую частицу, внутрь атома и молекулы. За такое достижение Лоренц с Зееманом получили в 1902 году Нобелевскую премию.

Далее, обсудим позиции Лоренца по поводу электродинамики движущихся тел. Вообще, тематика, связанная с системой отсчета, была очень важна для Лоренца. Такая проблема возникла еще у Максвелла. В электродинамике Вебера, за счет некоторых приемов, получалось, что взаимодействие частиц определялось относительным движением частиц. При этом переход из одной системы отсчета не вызывал проблем, как и в теории Ньютона.

В теории Максвелла часто встречаются производные по координатам и времени. При этом становилось непонятно, что будет происходить в другой системе отсчета. Максвелл обсуждал только симметрию, связанную с законом электромагнитной индукции (индуцированный ток возникал как при движении контура относительно магнита, так и при движении магнита относительно контура), и ввел известное преобразование полей.

Далее, он рассмотрел ситуацию, в которой мы переходим в другую систему отсчета. Он догадался, что даже при наличии каких-либо эффектов, их проявление будет определяться отношением $(v/c)^2$, где v – скорость системы отсчета относительно исходной, для которой записаны уравнения Максвелла.

Кстати, Максвелл, как и в случае с флуктуациями термодинамической системы, недооценил исследованные эффекты. Основатели статистической физики решили, что эти флуктуации слишком малы, чтобы их можно было обнаружить экспериментально. Так же и здесь. Он считал, что максимальная достижимая скорость – это скорость вращения Земли по орбите вокруг Солнца, 30 км/с. Сравнивая это значение со скоростью света, можно рассчитать, что $(v/c)^2 = 10^{-8}$. Максвелл решил, что в эксперименте невозможно достичь такой точности измерений, поэтому оставил эту тему в покое.

Ситуация изменилась в конце 19 века. Мы переходим к обсуждению опытов Майкельсона и Майкельсона-Морли, связанные с движением эфира. Эта тема очень сильно волновала Лоренца, и он постоянно к ней возвращался. Если вы почитаете даже названия статей Лоренца, то увидите, что «Электродинамика движущихся тел» часто встречается в заголовках.

Тем не менее, эффекты молекулярной оптики (в частности, эффект Зеемана) не совсем были связаны с электродинамикой, но все равно были очень важными результатами.

Отдельно выделим тему, связанную с электронной теорией проводимости металлов. Обратим еще раз внимание на то, что Лоренц относился с большим уважением не только к электродинамике Максвелла, но и к статистической теории. В частности, он следил за трудами Больцмана, и даже в семидесятые годы дискутировал с ним в переписке. Эта дискуссия, будучи весьма плодотворной, привела к тому, что Больцман, прислушавшись к Лоренцу, внес некоторые изменения в свои труды.

Ситуация еще больше обогатилась в начале 20 века, когда еще не все были уверены в эффективности статистической теории. В современных учебниках по общей физике часто упоминается электронная теория проводимости Друде-Лоренца. Некоторые студенты могут решить, что эта теория создавалась двумя авторами. Я уже не говорю о том, что особо недобросовестные учащиеся подумают, что это один и тот же человек с двойной фамилией. Тем не менее, работы Друде и Лоренца совпадают лишь в направлении идеи, которая заключалась в том, чтобы, отталкиваясь от модели электронного газа, на основании МКТ объяснить наличие закона Ома и проводимости металлов.

Но Друде продолжил линию Клаузиуса. Напомню, что Клаузиус объяснял явление диффузии на основании идеи длины свободного пробега и усредненных подходов, как это сейчас делается в учебниках по курсу общей физики. Для диффузии и вязкости такой подход оказывается более-менее эффективным, поэтому Друде использовал его же для объяснения проводимости.

Что касается Лоренца, то основные результаты его работы были опубликованы только в 1913 году. И эти результаты совсем другие. Он применил серьезный и математически очень сложный теоретический подход. Лоренц не использовал приближение длины свободного пробега – он пытался решать кинетическое уравнение Больцмана. Именно это было принципиальным новаторством в то время. А я напомню, что одна из причин кризиса Больцмана заключалась в том, что он не мог решить полученное им же уравнение. Он выдвигал какое-то описание процесса релаксации, но оно было основано на общих рассуждениях, а не на решении кинетического уравнения.

Во второй половине 20 века стало понятно, что получить приближенное решение можно только при рассмотрении диффузии легкого газа в тяжелом (именно такое приближение использовал Лоренц). Распределение тяжелого газа считалось известным (атомы кристаллической решетки металла), а рассеивание легкого газа (электронов) было вызвано внешним воздействием (электрическим полем).

Однако, несмотря на решенную задачу, последовательно объяснить проводимость металлов до конца не удастся. Однако, вины Лоренца в этом искать не стоит. Сейчас

мы прекрасно знаем, что электронный газ является вырожденным, и для него очень существенны квантовые свойства. Классически объяснить это явление невозможно.

Но ведь диффузия рассматривается не только для таких квантовых объектов. Если мы возьмем другие системы (реальные газы, например) то там квантовые эффекты становятся несущественными, а ценность решения Лоренца резко повышается.

На этом мы заканчиваем обсуждение достижений электронной теории Лоренца и идем дальше.

Открытие электрона

Наша следующая тема – открытие электрона. Оно произошло в 1897 году, но этому событию предшествовал прорыв в технологиях. Ситуация аналогична с тепловыми свойствами газов – для их исследования нужно было создать качественный термометр. Для открытия электрона принципиальным оказалось изобретение ртутного вакуумного насоса (1855).

В стеклянные вакуумные камеры сразу стали помещать катоды и исследовать проводимость самого вакуума. Открыли явление катодных лучей – свечение стекла в области катода (отрицательно заряженного электрода). В 1870 году Крукс предложил объяснить это явление свечением остаточного газа. Затем стали проводить некоторые оценки, результаты которых показали, что такое объяснение не подходит – слишком низкое давление и слишком высокая длина свободного пробега.

Далее, стали исследовать влияние внешних полей на положение возникающих светящихся пятен. Считается, что первым такие исследования провел Генрих Герц. Затем на это явление обратил внимание замечательный французский экспериментатор Перрен. Он заметил, что эти катодные лучи как-то связаны с накоплением отрицательного заряда.

Молодой исследователь Джозеф Джон Томсон обратился к систематическому изучению катодных лучей. Он получил целый ряд результатов, из которых следовала очень высокая скорость распространения катодных частиц. Кроме того, под действием комбинации электрического и магнитного поля имело место достаточно регулярное отклонение катодных лучей от прямолинейного распространения. Последний результат был подвергнут детальному исследованию. Оказалось, что можно довольно точно предсказать положение пятна катодных лучей. В результате, в 1897 году Томсон получил отношение заряда к массе для частицы катодных лучей.

Впоследствии была проведена целая серия экспериментов, в которых капельным способом измерялся заряд этой частицы. В итоге у Томсона получилось значение фундаментального электрического заряда.

Как мы уже отмечали, отношение e/m для катодной частицы получалось очень большое. А ведь еще в начале 19 века Фарадей проводил свои исследования электролиза, из которых отношение e/m получалось намного меньше. В конце концов, стало ясно, что это связано с очень маленькой массой электрона.

Нам осталось обсудить один интересный момент. Ведь имела место одна чисто теоретическая проблема, которой мы уже касались. Когда мы обсуждали принятие теории Максвелла в разных странах, то говорили о том, что в Англии никто особо не сомневался в применимости теории Максвелла. Но при попытке расчета энергии движущегося заряда возникала проблема. Первым этот расчет провел как раз Дж. Дж. Томсон. Он, еще на заре своей карьеры, обратил внимание на то, что энергия поля неподвижного заряда будет определяться электростатической частью. А при движении заряда возникает магнитное поле, которое пропорционально скорости заряда. Полная энергия, в свою очередь, пропорциональна квадрату скорости. Таким образом, получалось, что имелось два вклада в пропорциональную квадрату скорости энергию – исходный, связанный с массой шарика, и дополнительный, электромагнитный. Тут же возникает идея электромагнитной массы, которая приводит к мысли о том, что достаточно сложно отличить электромагнитную массу от массы инертной.

Впоследствии, в исследованиях Фицджеральда и Хевисайда выяснилось, что при более последовательном решении уравнений Максвелла, выражение для полной энергии будет немного сложнее. Энергия шара все еще четным образом зависела от скорости, но уже не квадратично. Таким образом, возникали два подхода – подход электромагнитной массы или подход массы, зависящей от скорости. Как вы понимаете, масса, зависящая от скорости, противоречит ньютоновской механике, что придавало этой идее некую новизну.

Электродинамика движущихся тел

Когда мы говорим о предтече специальной теории относительности, то мы должны понимать следующее. Есть две группы результатов – первая степень, $(v/c)^1$, вторая степень, $(v/c)^2$. В первой группе речь идет о влиянии явного движения на электромагнитные явления – например, влияние движения источника излучения, движения приемника (хорошо уже известный эффект Доплера).

Но внимание исследователей привлекло явление влияние движения массивной среды (например, воды). Интересно, что результат таких экспериментов был

предсказан Френелем в рамках его концепции частичного увлечения эфира. Концепция эта заключается в том, что при заполнении эфира некоторой средой, увлекаться будет только наиболее уплотненные участки эфира. Несмотря на некую странность этой идеи, она была подтверждена опытами Физо, и отмахнуться от нее уже было нельзя.

Лоренц видит, что другие эффекты влияния движения можно было объяснить идеей преобразования полей, которую еще высказывал Максвелл:

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{v}, \mathbf{B}]$$

Но эффект, исследованный Физо, надо объяснить по-другому. Лоренцу удалось это сделать, но ценой введения местного времени:

$$t' = t - \frac{vx}{c^2}$$

Надо отметить, что Лоренц не говорил напрямую о наличии принципиального изменения хода часов. Он лишь ввел некоторую поправку на масштаб времени при движении той же воды в лабораторной системе отсчета.

Имел место и второй порядок по отношению скорости тела к скорости света, $(v/c)^2$. Здесь приходится говорить о совершенно других вещах. Имеется абсолютная система отсчета, в которой записаны уравнения Максвелла. Тем самым и движение источника, и движение приемника – все оказывает влияние на оптические явления.

Иногда говорят, что Лоренц был сторонником концепции эфира. Но дело в том, что сейчас слово «эфир» заменяется словом «вакуум». Лоренц был сторонником концепции эфира в том смысле, что он осторожно относился к тому, как Максвелл писал свои уравнения, но, в целом, следовал его подходу. И та система отсчета, в которой записываются уравнения Максвелла, получается в каком-то смысле выделенной. Следовательно, она не симметрична по отношению к движению относительно нее. Даже если пользоваться преобразованием полей Максвелла, все равно будут происходить какие-то изменения. Лоренц это понимал.

Герц, действуя примерно в то же время (восемидесятые годы 19 века), предложил другой способ, который подробно описан в книжке Спасского. Герц предложил ввести вместо обычной частной производной по времени субстанциональную производную:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla)$$

Но в таком случае нам нужно знать скорость v оптического эфира, чтобы подставить ее в формулу выше. В подходе Лоренца такое не требовалось, поскольку все величины преобразовывались уже после записи уравнений Максвелла.

Как впоследствии оказалось, подход Герц обладает внутренними противоречиями, поэтому он долго не просуществовал. Но как пример альтернативного подхода, он имеет место быть.

К этому времени оказалось, что оптические исследования достигли существенных экспериментальных успехов по части точности, которая уже позволяла проверять поправки $(v/c)^2 = 10^{-8}$. Такие эксперименты проводил Майкельсон, американский исследователь. Лоренц принимал активное участие в обсуждении результатов этих экспериментов. Поначалу он критиковал теоретическую часть публикации – Майкельсон неправильно рассчитал вклад для абсолютного движения системы. Лоренц эти ошибки исправил, но в итоге получилось, что никакого абсолютного движения не получается.

Нам, с точки зрения истории физики, важно следующее. В результате серии опытов Майкельсона и Морли, все научное сообщество пришло к выводу, что никакого эффекта, предсказанного Максвеллом (абсолютное движение системы отсчета), не наблюдается.

Анри Пуанкаре и электронная теория Лоренца

Великий математик Анри Пуанкаре, творивший на рубеже 19 и 20 веков, оставил очень существенный след не только в фундаментальных разделах математики, но и в не менее фундаментальных разделах физики.

В 1904-1905 годах Пуанкаре выпустил несколько публикаций. Но еще в 1904 году Пуанкаре обратил внимание на следующее. В теории Лоренца, несмотря на ее замечательность, имеется логическая дыра. Она заключается в том, отдельно рассматриваются эффекты, связанные с движением системы отсчета, в то время как никакого эффекта движения среды ни в первом, ни во втором порядке по v/c нет.

И самое интересное заключается в том, что объяснения эффектов первого порядка, второго, и других, если они будут появляться – они все разные. Если в первом порядке все более-менее сходится, но приходится вводить местное время (для объяснения опыта Физо), то во втором порядке у Фицджеральда, а затем и у Лоренца появилась идея продольного сокращения. Таким образом, с точки зрения формальной логики, получается нехорошо. По-хорошему, все нужно объяснить с единой позиции.

Именно здесь у Пуанкаре появился принцип относительности (правда, только в применении к электронной теории Лоренца).

В 1905 году вышла знаменитая статья Пуанкаре «О динамике электрона», которая и сейчас привлекает активное внимание исследователей и вызывает активные дискуссии по поводу первенства теории относительности. Нам известно, что подход Пуанкаре сильно отличается от подхода Эйнштейна. Пуанкаре в своей статье исходит из системы уравнения Максвелла-Лоренца. Причем, если уравнения Максвелла были им взяты в исходном виде, то динамику электрона он подверг пересмотру. Далее, получившиеся уравнения Максвелла с новой динамикой электрона, он соединил с принципом относительности.

Надо сказать, что принцип относительности у Пуанкаре формулировался довольно близко к тому, что можно было наблюдать в работах Эйнштейна. Сам принцип заключался в том, что законы электронной теории Лоренца не зависят от того, к какой именно системе отсчета мы их относим. Этот принцип он сразу положил в основу своей теории (что тоже перекликается с работой Эйнштейна) и в дальнейшем использовал для конструктивного формирования изменений в теории Лоренца, которые ей были необходимы.

Как фундаментальный математик, Пуанкаре сделал важный вывод, который опережал свое время. Он сказал, что для существования симметрии (согласно принципу относительности), необходима группа преобразований, которая эту симметрию сохраняет. В наше время, как наверняка знают студенты теоретических кафедр, существует группа преобразований Лоренца и группа преобразований Пуанкаре. Такие названия являются своего рода знаком уважения к Лоренцу, потому что, на самом деле, именно Пуанкаре обратил внимание на то, что преобразования должны образовывать группу. Преобразования, которые использовал Лоренц, на деле же не до конца сохраняли симметрию уравнений.

Далее, Пуанкаре сразу же показал, какие есть инварианты у такой группы преобразований. Имеются координатно-временной инвариант и полевые инварианты:

$$r^2 - c^2 t^2, \quad (\mathbf{E}, \mathbf{H}), \quad E^2 - H^2$$

Наконец, у Пуанкаре появилось замечательное уравнение динамики электрона в том виде, в каком мы его используем сейчас:

$$\frac{d}{dt} \frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = e \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{v}, \mathbf{B}] \right)$$

В этом смысле работа Пуанкаре опередила события. Буквально через пару месяцев появляется статья Эйнштейна, к которой мы сейчас и перейдем.

Альберт Эйнштейн (1879-1955) и возникновение СТО

1905 год – «К электродинамике движущихся тел»



Надо отметить, что Эйнштейн использовал совершенно другой подход, который отличался от того, что было до этого, по целому ряду моментов. Это нужно осознать. Спор о том, кому принадлежит первенство теории относительности – Эйнштейну или Пуанкаре – на мой взгляд, не имеет смысла, так как они действовали совершенно по-разному.

В 1905 году, через пару месяцев после публикации работы Пуанкаре, появляется работа Эйнштейна, «К электродинамике движущихся тел». Мы знаем, что Эйнштейн был в физике в какой-то степени самоучкой. Считается, что поздние работы Лоренца (после 1900) и работы Пуанкаре Эйнштейн, в общем-то, не читал. Он действовал самостоятельно, опираясь на выдающуюся физическую интуицию.

Далее, в 1905 году опубликован целый ряд замечательных работ Эйнштейна. И помимо работ, посвященных специальной теории относительности, были опубликованы работа по броуновскому движению и работа по фотоэффекту, которая нас в особенности интересует. Кстати, именно за последние две работы Эйнштейн получает Нобелевскую премию.

Таким образом, в отличие от Пуанкаре, который подошел с математической стороны, попытавшись исправить дефекты перспективной теории Лоренца, Эйнштейн же мыслил о физике в целом. Он увидел, что если имеет место квантовые свойства света, то применимость системы уравнений Максвелла имеет ограниченную значимость. Как следствие, он не хотел использовать уравнения Максвелла в качестве постулатов.

Вместо этого он оставил минимум положений – два знаменитых постулата специальной теории относительности. Первый из них, обобщенный принцип относительности, отличался от принципа Пуанкаре именно всеобщностью действия. Второй постулат, задававший постоянство скорости света в пустоте, представлял собой более четкое и простое утверждение, чем система уравнений Максвелла. Это позволило Эйнштейну отталкиваться от фундаментальных соотношений и пересмотреть геометрию пространства-времени.

Первая часть обсуждаемого труда Эйнштейна представляла собой кинематическую часть, она же была наиважнейшей в этой работе. В ней содержались

определения одновременности, уточнялись методы измерения размеров тел и интервалов времени. В ней показано, что лоренцево сокращение длины и времени есть эффект, связанный с тем, что мы измеряем пространственный и временной интервал в движущейся системе отсчета.

Фактически, вся первая часть работы Эйнштейна посвящена обсуждению преобразований интервалов. От электродинамики в ней осталось только распространение света.

Вторая часть, электромагнитная, не отличается такой продвинутостью. Там, например, нет даже того уравнения динамики, которое было у Пуанкаре. Если вы прочитаете эту часть статьи Эйнштейна, то увидите, что в ней рассмотрена только уравнение динамики слабоускоренного электрона. Оно получается несложным образом – надо взять уравнение динамики электрона и разложить его в ряд по малому параметру – ускорению. При этом рассматриваются продольные и поперечные ускорения и соответствующие им продольные и поперечные массы.

Тем не менее, в этой части рассмотрен, например, поперечный эффект Доплера. Его, конечно, можно было получить и из подхода Пуанкаре, но тот этим вопросом просто не занимался, в отличие от Эйнштейна.

Но у Эйнштейна есть еще одна важная и интересная вещь. У него рассматриваются квантовые свойства света (за которые Эйнштейн, в итоге, и получил Нобелевскую премию). В этой работе мы находим формулу для энергии кванта света:

$$E = \hbar\omega$$

Так вот, в электромагнитной части работы Эйнштейн показал, что энергия преобразуется (при переходе из одной системы отсчета в другую) так же, как частота.

Механика специальной теории относительности

Еще раз укажу на следующее. Есть такая позиция, согласно которой механика СТО сменила «устаревшую» механику Ньютона. Так вот, давайте будем в этом отношении грамотными людьми.

Да, для обывателя можно сказать, что одна механика заменила другую. Но вы, как образованные люди, должны понимать следующее. Мы говорим о механике как о системе взаимодействующих тел с конечным числом степеней свободы. И если под механикой подразумевать именно это, то другой механики у нас нет до сих пор. Взаимодействие тел через дальнodelствующие силы (как это было у Ньютона) есть единственный возможный способ описания движения. Другое дело, что такое способ не

всегда «работает». При рассмотрении взаимодействия двух заряженных тел без полевых эффектов не обойтись.

Тем не менее, в механике СТО есть два принципиальных момента. Во-первых, Планк, проникнувшись идеями Эйнштейна, дополнил их теми результатами, которые отчасти можно было найти у Пуанкаре (1906). Причем, в отличие от Пуанкаре, у Планка было непонятно, что за сила действует на частицу. Тем не менее, для отдельной частицы можно записать функцию Лагранжа, функцию Гамильтона, импульс и энергию. Но такой подход не описывал взаимодействие частиц, а лишь взаимодействие частицы с полем.

Инварианты СТО, геометрия пространства-времени

Затем, в 1909 году, Льюис и Толмен в каком-то смысле вернулись в «доньютонову» эпоху. Как вы помните, в 17 веке существовала концепция столкновений взаимодействующих тел. В 1666 году были замечательные работы Гюйгенса, в которой он рассматривает, как бы мы сейчас сказали, законы сохранения, исходя из симметрии удара и преобразований Галилея. Такой же подход использовали Льюис и Толмен, которые рассматривали столкновения релятивистских частиц, уже используя преобразование Лоренца.

Обсудим еще релятивистскую связь массы и энергии. Здесь надо четко фиксировать, что касается электродинамики и электронной теории. Ключевая роль здесь принадлежит Пуанкаре. Еще в конце 19 века он показал, что важнейшим нюансом является наличие у электромагнитного поля тензора энергии-импульса. Вы знаете, что для существования такого тензора требуется, чтобы плотность импульса с точностью до постоянной совпадала с плотностью потока энергии. Такую роль выполняет вектор Пойтинга.

Дальше была знаменитая статья Эйнштейна, в которой он написал $E = mc^2$. Планк вернулся к этому вопросу и обнаружил, что не только у электромагнитного поля, но и у вещества есть тензор энергии-импульса. Вот таким образом этот вопрос был решен еще в начале 20 века.

Затем нужно вспомнить Минковского, который в 1908 году разобрался с математически-философским вопросом. Ведь специальная теория относительности произвела на обывателя очень сильное воздействие, потому что там возникали такие непонятные обывателю вещи, как относительность одновременности, сокращение длины и изменение интервала времени. Минковский, как выдающийся математик, разобрался с этим вопросом. Он показал, что существуют различные геометрии. И если

физическая теория основана на различных геометриях, то она имеет различные инварианты. У специальной теории относительности есть свои инварианты, которые задаются преобразованиями Лоренца. Минковский впервые показал, что СТО работает с псевдоевклидовой геометрией четырехмерного мира.

Кроме того, стоит отметить, что философский релятивизм больше носился в головах у философов и обывателей.

Признание СТО

В этой подтеме я не буду особенно оригинален. Когда мы говорим об опытах с движением электронов в электрическом и магнитном полях, то СТО, по сравнению с электронной теорией Лоренца, не дает никаких новых результатов. Принципиальным моментом являются события конца тридцатых – начала сороковых годов. Были открыты ядерные силы. Оказалось, что принципиально другая пространственно-временная конструкция Эйнштейна является базой и для других взаимодействий, в данном случае, для ядерных сил. Были открыты распадающиеся мезоны. И время их жизни зависело от скорости движения именно по теории Эйнштейна.

Лекция 11. Возникновение квантовой теории

План лекции:

Теория теплового излучения. Начало квантовой теории.

Сложности классической физики на рубеже 19 века:

- Объяснение уменьшения удельной теплоемкости твердых тел при $T \rightarrow 0$.
- Значение теплоемкостей газов и объяснение «невключения» некоторых внутренних степеней свободы. Аналогично, при упругих столкновениях.
- Проблема непрерывного спектра равновесного (теплого) излучения черного тела

Что было известно к 1900 году:

- Закон Кирхгофа, 1859:

$$\varphi(\lambda, T) = \frac{A(\lambda, T)}{B(\lambda, T)}$$

- Изотермическая полость – излучатель типа твердого тела – был введен в практику в опытах Луммера и Вина в 1895 году в Берлинском Имперском физико-техническом институте.
- В 1879 году в Вене Стефан из эксперимента (на самом деле, сомнительного) показал:

$$E_{integrated} = \int \varphi(\lambda, T) d\lambda \sim T^4$$

- В 1884 году Больцман дал теоретическое закону Стефана доказательство, используя термодинамику и электродинамику Максвелла.
- В 1894 году появился закон смещения Вина:

$$\lambda_{max} \cdot T = const$$

- Также было показано, что:

$$\varphi(\lambda, T) = \lambda^{-5} \cdot \bar{\varphi}(\lambda \cdot T)$$

для чего был учтен эффект Доплера. Этот закон проверен экспериментально Пашеном в Берлине в 1899 году.

- Знаменитая работа Вина, где он выводит «закон Вина», 1896:

Ход его рассуждений: Вин ссылается на Михельсона (русского физика-статика в духе Максвелла-Больцмана). Идея однозначной связи длины волны излучения молекулы и энергии этой молекулы (эта идея, с точки зрения классической физики, весьма сомнительна). Молекулы распределены по Максвеллу:

$$v^2 \exp(-v^2/aT) dv; \quad v^2 = f(\lambda)$$

- Закон Вина:

$$\varphi(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp(C_2/\lambda T)$$

- Экспериментально формула Вина подтвердилась, но теория оставалась непонятной

Деятельность Макса Планка.

Первый подход Планка к проблеме: (См. Макс Джеммер, «Эволюция принципов...»)

- φ не зависит от вещества. Идея гармонических осцилляторов (теорию излучения электрического диполя в 1889 году создал еще Герц).
- Планк хотел использовать распределения из теории газов, но более основательно, чем это делал Вин. Планк ввел гипотезу «естественного излучения», по аналогии с гипотезой о «молекулярном хаосе»:

$$\varphi(\lambda, T) \rightarrow u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U(\nu, T)$$

где $U(\nu, T)$ – средняя энергия осциллятора в тепловом равновесии.

- Планк не применил теорему Больцмана о равнораспределении энергий по степеням свободы, иначе бы получился закон Рэлея-Джинса.
- К 1900 году экспериментально обнаружены отклонения от формулы Вина в области длинных волн (Луммер и Принсгейм, $\nu \rightarrow 0$)
- Летом 1900 года Рэлей применяет теорему о равнораспределении и подсчитывает число стоячих волн – собственных мод в замкнутой полости – и получает:

$$u(\nu, T) = C_1 \nu^2 \cdot \beta T$$

Формула Рэлея согласовывалась с экспериментом в области $\nu \rightarrow 0$, но $\int u(\nu, T) d\nu \rightarrow \infty$ - УФ катастрофа. Джинс ввел поправку 1/8. В октябре 1900 года аналогичная формула экспериментально подтверждена Рубенсом и Курльбаумом.

Второй подход Планка. Применение интерполяции и термодинамики:

- 19 октября 1900 года – Планк применяет *интерполяцию* (Вин, Рубенс, Курльбаум, но не Рэлей) и *термодинамику*:

$$U(\nu, T) = \frac{\text{const} \cdot \nu}{\exp\left(\frac{C'\nu}{T}\right) - 1}; \quad dU = TdS$$

- 14 октября 1900 года – Доказательство формулы Планка через «Больцмановский» подход – вероятностную концепцию энтропии $S = k \ln W$, где W – число комплексов, реализующих данное макросостояние:

$$W = \frac{(N + P - 1)!}{(N - 1)! P!},$$

Где N – число осцилляторов, E – энергия одного осциллятора, $E = \varepsilon P$, ε – квант энергии, P – целое число. Из такого подхода получалось, что

$$U = \frac{\varepsilon}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{kT}\right) - 1}$$

Позже Планк показал, что $\varepsilon = h\nu$, где h - мировая константа. Уточнив значение из экспериментов, Планк сумел впервые точно рассчитать k, N_A, e, m_e .

- До 1905 года открытие Планка недооценивалось.
- В 1910 году Лоренц показал несовместимость теории Планка с законами классической физики.

Возникновение идеи квантов и ее применение.

Теория фотоэффекта. Идея кванта света (фотона):

- Эйнштейн показал, что если осциллятор квантуется, то обычная электродинамика, как теория излучения этого осциллятора, неприменима. Значит, ее нельзя использовать для расчета равновесного излучения в полости.
- 1905 – Работа Эйнштейна «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света» резюмировала его сомнения в классической электромагнитной теории света:
 - Эйнштейн показал, что, если полость заполнена равновесным излучением в соответствии с законом Вина, то это излучение, в смысле термодинамики, ведет себя как газ из частиц с энергией $h\nu$. При $h\nu \gg kT$ получается формула Планка.
 - Эйнштейновская теория фотоэффекта.
 - Трудность: как объяснить интерференцию при разностях хода до $10^6 \lambda$?
 - Экспериментальные данные в пользу гипотезы Эйнштейна: в 1903 году Дж.Дж.Томсон указал на особенность ионизации рентгеновскими лучами – игольчатая структура распределения энергии.

Фотоэффект

- Открыт в 1886 году Генрихом Герцем (он обнаружил, что УФ свет увеличивает длину искры).
- 1889 – Столетов экспериментально исследовал фотоэффект, показав наличие красной границы. Он создал первый фотоэлемент и показал, что $I_{\text{фототок}} \sim W_{\text{интенсивность}}$
- 1899 – Джозеф Джон Томсон отождествил носителей фототока с электронами
- 1899 – Ленард подтвердил результаты опытов Дж.Дж.Томсона.
- 1903 – Ладенбург показал, что энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности света, а пропорциональна частоте.
- 1905 – Эйнштейн, $A + mv^2/2 = h\nu$.
- 1912 – формула Эйнштейна блестяще подтверждена Хью, Ричардсоном, Комптоном, а в 1916 – Милликеном.
- 1909 – Штарк высказал идею о том, что, согласно СТО, фотон должен обладать импульсом $h\nu/c$.

- 1922 – исследования Комптона по взаимодействию электронов с излучением. Окончательное подтверждение теории фотонов.

Идея корпускулярно-волнового дуализма света

В 1909 году Эйнштейн опубликовал работу «К современному состоянию проблемы излучения». Пользуясь формулой Планка, Эйнштейн рассчитал флуктуацию средней энергии теплового излучения в единице объема V , при температуре T и в частотном диапазоне $\nu \div \nu + d\nu$:

$$\overline{(E - \bar{E})^2} = \bar{E} h \nu + \frac{c^3 \bar{E}^2}{8\pi \nu^2 V d\nu}$$

В этом выражении максвелловская теория дает только второе слагаемое (как интерференция парциальных волн). Первое можно получить из идеи квантов света, подчиняющихся классической статистике. Эйнштейн хотел показать несовместимость волновой теории света и формулы Планка, но через некоторое время из этих попыток сформировалась концепция корпускулярно-волнового дуализма света.

Применение идеи квантов – новая механика:

- Краковский физик Натансон в 1911 году обратил внимание на метод подсчета комплексов и на гипотезу равновероятности. В итоге, сформулировались две ситуации:
 - «приемники» энергии можно различить. «Моды расположения» - Эйнштейн (1905), Вин (классический газ).
 - «приемники» энергии нельзя различить. «Моды соединения – идея Планка.
- Эренфест.
- Иоффе и Крутков.
- *Сольвеевский конгресс*, ноябрь 1911 года, организованный Нернстом и Эрнстом Сольвэ, бельгийским меценатом. Основные дискуссии на этом конгрессе были посвящены проблеме излучения твердого тела. В центре стоял доклад Планка. Модификация классической статистики Максвелла-Больцмана-Гиббса для осциллятора $E = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2} \beta q^2$, при $E = E_n = n\varepsilon = nh\nu$. Тогда:

$$\langle E \rangle = \frac{\sum_n E_n \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right)}{\sum_n \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right)} = \frac{\varepsilon}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{kT}\right) - 1}$$

То же можно получить, квантуя фазовый объем, то есть, вводя ячейки:

$$\iint\limits_E^{E+\varepsilon} dp dq = h - \text{правило квантования}$$

Таким образом, надо модифицировать классическую механику. Планк первым указал на необходимость отказа от принципа универсальной справедливости классической механики.

Теплоемкость твердого тела

- В 1907 году Эйнштейн опубликовал работу «Теория излучения Планка и теория удельной теплоемкости». Эксперимент показывал, что при $T \rightarrow 0$ теплоемкость $C \rightarrow 0$, что противоречило классической теории. Эйнштейн ввел систему планковских осцилляторов с одинаковой частотой ν , для которой:

$$E = \frac{3N_A h\nu}{\exp(\beta\nu/T) - 1}; \quad C = \frac{dE}{dT}$$

- В 1912 году Дебай, а позднее Борн и Карман предположили более последовательную теорию, объяснявшую поведение теплоемкости при малых температурах. Нернст продемонстрировал фундаментальность такого поведения.
- *Интерпретация равновесных статистических распределений.* В 1924 году Шатьендранат Бозе из Дакки (Индия-Бангладеш) прислал письмо Эйнштейну, в котором на основе идеи дискретного объема в фазовом пространстве (h^3) предложил ввести новую статистику для вывода формулы Планка. В сентябре 1924 года Эйнштейн, зная о работах Луи де Бройля, нашел новое применение для новой статистики (статистики Бозе) – идеальный газ квантовых частиц, «волновой вклад» для частиц!

Теория теплового излучения. Начало квантовой теории

Сегодня у нас будет очень важная тема – возникновение квантовой теории. Как и при рассмотрении других тем до этого, нам важно сначала сформулировать некоторую мораль. Ведь зачастую те послы, которые присутствуют в учебниках, противоречат реальности.

Обсуждая историю создания СТО, мы говорили, что важнейшую роль сыграли не эксперименты по быстрому движению ускоренных частиц и исследованию особых свойств таких частиц. Решающую роль, в первую очередь, сыграли внутренние противоречия в системах частицы-поле, которые пытались состыковать механику Ньютона с классической электродинамикой. Оказалось, что в этой системе было необходимо принципиально что-то менять.

Так вот, историю квантовой теории можно излагать аналогичным образом. При этом обычно вспоминают известную «ультрафиолетовую катастрофу», которую мы еще обсудим. Далее, указывают на противоречие между классической статистической физикой, механикой и теорией равновесного теплового излучения. Однако надо

сказать, что логическое противоречие между этими теориями сыграло все же вторичную роль. Обратимся к реальному развитию ситуации.

Что было известно к 1900 году

Рассматривая начальный период развития квантовой теории, первым делом надо отметить закон Кирхгофа, который вы хорошо знаете. Вообще, весь обсуждаемый нами начальный период вы можете без труда восстановить в своей памяти, поскольку сама статфизика была у вас не так давно. И в первом разделе этого курса (в термодинамике) вы рассматривали различные термодинамические системы, в том числе, равновесное тепловое излучение.

Как вы помните, у этого излучения есть целый ряд свойств, которые вытекали как из базовых свойств самого излучения, так и из основных законов термодинамики. Давайте вспомним эти основные законы.

Во-первых, речь идет о законе Кирхгофа. Согласно ему, имеется некоторая функция, зависящая от длины волны и температуры, которая описывает равновесное излучение черного тела:

$$\varphi(\lambda, T) = \frac{A(\lambda, T)}{B(\lambda, T)}$$

Согласно закону Кирхгофа, если имеется термодинамическое равновесие в системе тел, то при температуре T , зная спектр $\varphi(\lambda, T)$, можно ввести функции $A(\lambda, T), B(\lambda, T)$, где первая функция описывает излучающую способность в некотором спектральном диапазоне, а вторая – поглощающую способность. Важно, что функция $\varphi(\lambda, T)$ описывает спектр излучения именно черного тела, так как всегда можно положить $B = 1$, получив модель абсолютно черного тела.

Вышенаписанное отношение не зависит от природы вещества, а в случае теплового равновесия даже представляет собой конкретную функцию. Именно фундаментальность этого соотношения привлекло внимание исследователей. Довольно быстро (1859) удалось доказать справедливость закона Кирхгофа, но саму функцию, описывающую излучения, определить так и не удалось. Как вы помните, одними лишь термодинамическими методами эту функцию получить невозможно.

Что же удалось вывести, основываясь на одной лишь термодинамике? Во-первых, полное интегральное излучение:

$$E_{integrated} = \int \varphi(\lambda, T) d\lambda \sim T^4$$

Этот интеграл, называемый сейчас законом Стефана-Больцмана, несложно получить, если сделать определенные предположения. Исторически, в 1979 году, венский экспериментатор Стефан опубликовал этот закон. И, с точки зрения истории физики, этот момент вызывает любопытство. Дело в том, что последующее внимательное изучение работы Стефана показало, что ее точность была недостаточной. Таким образом, к своему закону Стефан пришел, вообще говоря, случайно.

Многokrатно упомянутый нами коллега Стефана, Людвиг Больцман, обратил внимание на эту работу и чуть позже, в 1884 году, опубликовал теоретический анализ этого вопроса. Именно он смог теоретически вывести вышенаписанный интеграл, основываясь на термодинамических законах. Так как с теорией поспорить было трудно, то утверждению закона Стефана-Больцмана ничего не помешало. Тем не менее, этот закон не давал ответ на вопрос о структуре функции $\varphi(\lambda, T)$.

Далее, нам остается упомянуть лишь закон смещения Вина. Как вы помните, утверждение Вина касалось положения максимума функции $\varphi(\lambda, T)$ относительно температуры. На самом же деле, Вин, в 1894 году, с помощью термодинамических соображений (плюс давление света и эффект Доплера) доказал, что функция двух переменных $\varphi(\lambda, T)$ на самом деле является функцией одной переменной, которая есть произведение длины волны на температуру:

$$\varphi(\lambda, T) = \lambda^{-5} \cdot \bar{\varphi}(\lambda \cdot T)$$

Надо сказать, что существенную роль сыграли не какие-то внутренние противоречия в статистической физике, термодинамике и электродинамике, а возможность создания того самого черного тела. То есть, модель черного тела оказалась не той абстрактной моделью, которые часто имеют место в той же механике (например, гладкая поверхность). Оказалось, что эту модель можно реализовать в лабораторных условиях, добившись при этом высочайшей точности. Далее, удалось экспериментально же создать балометр – прибор, позволяющий измерять интенсивность теплового излучения в определенном диапазоне.

Наконец, важную роль сыграла новая форма организации научных исследований, впервые появившаяся в Берлине. Берлинский физико-технический институт был научным центром, который сконцентрировал усилия замечательных немецких теоретиков и экспериментаторов. Именно там работал и Вин, и Планк. Пашену удалось экспериментально доказать закон Вина. И здесь я имею в виду не закон смещения Вина, а конкретную формулу для спектра излучения, предложенную Вином:

$$\varphi(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp(C_2/\lambda T)$$

Обсудим историю появления этой формулы. Здесь сыграл определенную роль наш соотечественник, физик Михельсон. Он опубликовал статью, в которой предлагал воспользоваться статистикой Максвелла-Больцмана, но с дополнительной связью между длиной волны и квадратом скорости частицы. Но так получилось, что Михельсон не знал закона смещения Вина. А если этот закон учесть (что и сделал Вин), то практически получается вышенаписанная формула.

Спустя год после экспериментов в Берлинском институте оказалось, что закон Вина действительно описывает реальные экспериментальные данные. Но с другой стороны, было непонятно, откуда же берется связь между скоростью частицы и длиной волны (в рамках подхода того времени). Теоретическое обоснование было довольно зыбким и непонятным.

Деятельность Макса Планка

Первый подход Планка к проблеме

В 1900 году к обсуждаемой проблеме подключается Макс Планк. И в его деятельности есть несколько нюансов, заслуживающих внимания. Во-первых, имеется первая часть этой деятельности – получение формулы для спектра теплового излучения.

Планк воспользовался идеей того, что любая система может рассматриваться в равновесии с излучением. Не так важно, рассматриваете вы излучатель или поглотитель. Далее, он взял систему гармонических осцилляторов.

$$\varphi(\lambda, T) \rightarrow u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U(\nu, T)$$

Здесь слева стоит функция, которую стали изучать после появления закона Кирхгофа, а справа стоит произведение «электродинамического фактора» $8\pi\nu^2/c^3$ и некоторой функции $U(\nu, T)$ – средней энергии осциллятора в тепловом равновесии. Казалось бы, это понятие уже много раз возникало в рамках теории Максвелла-Больцмана. Здесь осциллятор представлял собой некоторое тело с определенной массой, которое, грубо говоря, удерживается упругой силой у положения равновесия, и совершает колебания. Если рассмотреть систему, в которой осциллятор заряжен, то такая система будет излучать электромагнитные волны. Средняя энергия такого осциллятора определяется частотой его колебаний, которая, в свою очередь, определяется его массой, «жесткостью» упругой силы и температурой равновесия.

Но здесь есть один нюанс. Дело в том, что эта формула не могла появиться раньше, так как она основана на достаточно продвинутых для того времени соображениях – о том, как излучение такого осциллятора (который, по сути, представлял собой диполь Герца), взаимодействует с самим осциллятором. Эти идеи основаны на теории излучения Герца.

Далее, Планк воспользовался некоторыми идеями Максвелла и Больцмана, которые те использовали в своей статистической физике. Например, у них была идея «молекулярного хаоса», согласно которой, различные молекулы газа имеют статистически независимое положение в фазовом пространстве. Планк считал, что с тепловым излучением нужно действовать аналогично. Поэтому он счел осцилляторы независимыми (значит, и некогерентными), в результате излучения которых получается естественная поляризация.

Отметим, что Планк в своих работах сделал замену переменных – вместо длины волны он использовал частоту. В то время как в предыдущих работах (в том числе, и у Вина) используется распределение по длине волны.

Здесь зачастую делают не очень правильный вывод. Указывают на внутреннее противоречие – по теории Максвелла-Больцмана, при использовании осциллятора нужно использовать теорему о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Если воспользоваться таким подходом и в качестве $U(\nu, T)$ взять kT , то получится известная формула Рэлея-Джинса. В результате такого рассмотрения получится известное противоречие – ультрафиолетовая катастрофа. Другими словами, интеграл по всем частотам будет расходиться.

Но надо сказать, что Планк и его коллеги и не собирались брать такой интеграл, по разным причинам. Поэтому, хоть сама концепция ультрафиолетовой катастрофы весьма логично вплетена в учебный курс, но, с исторической точки зрения, она появилась лишь позже, в результате анализа ситуации другими людьми. На самом деле, тогда была формула Вина, которая вполне хорошо сходилась на больших частотах. В результате, можно было получить какое-то выражение для $U(\nu, T)$, которое, однако, не соответствовало бы теореме о равномерном распределении энергии по степеням свободы.

Но дело в том, что все это происходило в 1900 году. Именно тогда, как вы помните, теория Максвелла-Больцмана терпела максимальный кризис. Поэтому теорема о равномерном распределении энергии была довольно сомнительной. Планк, несмотря на уважительное отношение и к Максвеллу, и к Больцману, все же пользовался их результатами довольно осторожно.

Далее, вспомним дискуссию Максвелла и Томсона. Мы знаем, что еще в конце шестидесятых – начале семидесятых годов 19 века имело место осторожное отношение Томсона к теореме о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Это было связано со следующим. С одной стороны, Томсон видел, что МКТ в состоянии предсказать некоторые явления, и ее стоит принять в каких-то базовых положениях. Но, с другой стороны, в представлении Томсона, атом представлял собой некий вихрь (сейчас бы нарисовали какой-нибудь солитон). То есть, он занимал конечный объем в пространстве, но имел континуум степеней свободы. И теорема о равномерном распределении энергии к такому представлению никак пристыковаться не могла. Это и объясняет сложное отношение Томсона (да и многих других ученых) к теории Больцмана.

Как следствие такого отношения, основные положения, на которые опирался Планк, не могли быть положениями статистической физики.

Далее, к 1900 году, экспериментальные исследования коллег Планка, Луммера и Принсгейма, обнаружили отклонения от формулы Вина на малых частотах (на больших частотах закон Вина был экспериментально подтвержден исследованиями Пашена). К октябрю 1900 года даже была обнаружена линейная зависимость интенсивности излучения от температуры.

Параллельно этим исследованиям происходили интересные события в Британии. Специалист по волнам разной природы, лорд Рэлей, опубликовал работу, в которой рассматривал систему стоячих волн в полости. Он показал, что в тепловом равновесии было бы логично ввести следующую формулу:

$$u(\nu, T) = C_1 \nu^2 \cdot \beta T$$

Обратите внимание, что иногда в этой формуле сразу пишут kT . Но здесь надо быть осторожным. Дело в том, что до следующей работы Планка, которую мы обсудим чуть позже, не была известна сама постоянная Больцмана.

В расчетах Рэля имела некоторая неточность, которую поправил его коллега Джинс. Поэтому полученную формулу мы сегодня называем законом Рэля-Джинса. Вплоть до октября 1900 года Планк не знал об этих работах. Закон Рэля-Джинса, тем не менее, была экспериментально подтверждена на малых частотах Рубенсом и Курльбаумом.

Как вы помните, события, связанные с развитием специальной теории относительности, стали стремительно развиваться в середине 1905 года. Так вот, с зарождением квантовой теории ситуация аналогичная – основные достижения были опубликованы осенью-зимой 1900 года. Несмотря на то, что теория Планка была

оценена немного позже, реконструировать последовательность событий довольно несложно. На эту тему было написано довольно много книжек.

Второй подход Планка. Применение интерполяции и термодинамики

В конце октября 1900 года Планк публикует интересную идею. Он видел, что есть два предельных, подтверждающихся в эксперименте случая – высокочастотный и низкочастотный. Эти два случая Планк пытался склеить в одну формулу с помощью интерполяции. В результате у него получилась следующая формула:

$$U(\nu, T) = \frac{\text{const} \cdot \nu}{\exp\left(\frac{C'\nu}{T}\right) - 1}$$

При выводе этой формулы Планк показывал, что он имеет дело не с самой плотностью излучения, а с энтропией. Правда, какого-нибудь серьезного, научного вывода Планк не привел, ограничившись интерполяцией различных экспериментальных пределов.

И здесь стоит обратить внимание на следующую вещь. Ранние специалисты по истории развития физики говорили, что физика развивается как индуктивная наука, получая новые физические законы из интерполяции и экстраполяции экспериментальных результатов. И, несмотря на то, что в реальной истории такой подход работал не всегда, в данном случае он сработал.

На Планка и его коллег произвел сильное впечатление тот факт, что константы, входящие в написанную им формулу, позволили получить закон для плотности излучения, который экспериментально подтверждался во всем диапазоне частот. Поэтому 14 декабря выходит вторая знаменитая работа Планка. Эти две работы и породили новую квантовую теорию.

В этой второй работе Планк попытался теоретически обосновать формулу, которая прекрасно работала. Метод Планка, который привлекал к себе внимания, был совершенно замечательным. Подозреваю, что многие знают, в чем он заключался. Тем не менее, на некоторые нюансы этого метода я все же обращаю внимание.

В первую очередь, в результате экспериментов были получены числовые значения многих констант. Среди них как константа Больцмана и постоянная Авогадро, так и значение заряда и массы электрона. Вкупе с экспериментами на катодных лучах, последние две константы удалось значительными образом уточнить. Поэтому та россыпь констант, которую получил Планк, является одним из выдающихся его достижений.

В результате использования «Больцмановского» подхода появляется знаменитая формула $S = k \ln W$. Тем не менее, у Планка есть масса отличий от метода Больцмана. Начать следует с того, что у Планка W – не вероятность макроскопического распределения, а число микросостояний, реализующих данное макросостояние. Однако, сильного различия нет - поделив последнее число на полное число микросостояний (воспользовавшись равновероятностью всех состояний), получится первое определение W .

Далее, сам подсчет этих комплексов (микросостояний) у Планка другой:

$$W = \frac{(N + P - 1)!}{(N - 1)! P!},$$

где N – число осцилляторов, E – энергия одного осциллятора, $E = \varepsilon P$, ε – квант энергии, P – целое число. Конечно же, этот подсчет устроен так, чтобы получить известную формулу. Ведь в работе Больцмана 1877 года, где он через это соотношение выводит распределение Максвелла-Больцмана, как реализующее максимум энтропии, тоже имеются ячейки (как и у Планка). Но у Больцмана все частицы различимы, поэтому в знаменателе остается факториал числа частиц. Да, если вы поменяете местами частицы, то макросостояние от этого не изменится. Но, согласно Больцману, микросостояние при этом уже становится другим, и его надо учитывать отдельно.

Планк же вводит следующую идею. У него есть распределение по осцилляторам, которых всего N штук. Также имеется распределение порций энергий. И здесь стоит обратить внимание на то, что само распределение, по-хорошему, надо было изначально проводить в фазовом пространстве. Тогда и не пришлось бы вводить распределение по энергии (которое отсутствует в статфизике, но имеется в дурных учебниках). Лишь после Эйнштейна стало понятно, что у фотона фазовое пространство устроено по-другому, так как у него энергия и импульс пропорциональны друг другу.

Так вот, Планк вводит порции энергии. А когда речь идет о таких порциях, то возникает вопрос – как их вообще различать? Как их можно пронумеровать? Это в принципе невозможно. Таким образом, Планк, делая отступления от метода Больцмана, подходит к правильным, для нас уже очевидным результатам.

Далее, метод подсчета комплексов Планка становится почвой для дискуссий на тему различий между квантовой и классической статистикой. В результате возникает интересный момент – если у Больцмана (1877), в результате его подсчета, размер ячейки в ответ не вошел, то у Планка размер порции (квант энергии) вошел в экспоненту в ответе.

Итак, в 1900 году вышли упомянутые две замечательные работы Планка. В них появились не только новое распределение и значения констант. И вам, как выпускникам физического факультета, стоит быть аккуратными в формулировках. Иногда говорят о «порциях» энергии. Но в статистической физике мы говорим о ячейках в фазовом пространстве, и планковские «порции» энергии следует понимать в примерно том же смысле. Нужно иметь в виду, что постоянная Планка показывает дискретность такой новой для физики величины, как **действие**, с которым вы сталкивались в курсе теоретической физики. Но до теоретического понимания этого момента прошло еще довольно много времени.

Планк видел определенный успех своей формулы. Он понял, что его подход к выводу этой формулы подразумевает под собой некую дискретность. При этом, Планк считал, что вся эта дискретность связана с тем, что есть некоторое новое явление, которое было открыто только что – система некогерентных дипольных осцилляторов, то, чем занимался Герц. Планк считал, что его анализ не до конца полноценен, и что с этим вопросом можно разобраться. Он считал, что никакой радикальный передел ни в статистической физике, ни в классической механике не требуется, нужно лишь более внимательно изучить процесс излучения.

Прошло 10 лет, прежде чем взгляд на работу Планка радикально изменился. Лишь в 1910 году Генрих Антон Лоренц окончательно доказал, что никакими классическими подходами невозможно объяснить ни дискретность, ни формулу Планка. Таким образом, требуется радикальный пересмотр основ теории.

Возникновение идеи квантов и ее применение

Теория фотоэффекта. Идея кванта света (фотона)

Далее, квантовые явления проявили себя в совершенно другой области. События происходят в 1905 году, спустя 5 лет после работ Планка. Знаменитая работа Эйнштейна, «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света», очень важна по ряду причин. Она объясняет особенности подхода Эйнштейна к вопросам электродинамики.

Когда мы говорили о СТО, мы обратили внимание на то, что Эйнштейн, в отличие от Пуанкаре, не использует набор уравнений Максвелла в качестве основы своей теории. Так вот, эта особенность была связана с тем, что Эйнштейн видел некие червоточины в чисто максвелловской электродинамике. Идеи дискретности и фотона, возникшие у Эйнштейна в 1905 году при объяснении фотоэффекта, не укладывались в систему Максвелла.

Конечно, Эйнштейн понимал, что из этой несостыковки не следует, что теорию Максвелла надо радикально переделывать. Вместо этого он взял из теории Максвелла факт постоянства скорости света в вакууме и получил замечательную теорию относительности.

В работе же, чье название написано выше, имеется две части. Обратим внимание, что первая тема – вывод формулы Планка – очень часто присутствует в других работах, авторы которых были неудовлетворены выводом самого Планка. Эйнштейн же выводит формулу Вина (ну, или высокочастотный предел формулы Планка). В отличие от не столь решительного Вина, Эйнштейн воспользовался идеей газа из квантов света. Сам термин «фотон» формально возникает несколько позже, но мы, читая работу Эйнштейна, видим, что речь в ней идет именно о фотонах.

Обратите внимание, что Планк относил дискретность только лишь к процессу обмена действием между осцилляторами и электромагнитным излучением. Планк не сомневался в волновых свойствах самого излучения.

Эйнштейн, забыв о столетнем развитии волновой оптики, стал рассматривать излучение как газ частиц с энергией $h\nu$. Тогда, по теории Максвелла-Больцмана, мы можем вывести формулу для распределения энергии. В результате получается формула Вина. В этом заключалась первая часть работы Эйнштейна.

Вторая часть работы включала в себя саму теорию фотоэффекта Эйнштейна. Именно здесь появляется знаменитая формула Эйнштейна, которую проходят еще в средней школе:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + E_k^{\text{max}}$$

Стоит сказать, что теория фотоэффекта во второй части работы излагается довольно контурно – это вам не квантовая электродинамика. Тем не менее, явление красной границы в фотоэффекте объясняется тем, что поглощение в однофотонном пределе связано с работой выхода.

Интересно, что вышенаписанная формула Эйнштейна позволила в задаче, не имеющей теплового термодинамического излучения (нет температуры), получить ответ.

Так же можно упомянуть другие свидетельства определенной дискретности. В 1903 году Джозеф Джон Томсон указал на то, что при наличии потока рентгеновского потока, ионизация газа, через который проходит это излучение, происходит не равномерно по фронту излучения, а в как будто случайных, отдельных, дискретных точках.

Фотоэффект

Вернемся немного назад и проследим историю явления фотоэффекта. Считается, что именно Герц открыл фотоэффект, проводя свои опыты с излучением и приемом электромагнитных волн, 1886 год. Он обнаружил, что ультрафиолетовый свет увеличивает длину искры. Однако подробных исследований этого явления Герц не проводил.

Исследованием фотоэффекта занимался профессор Московского университета Александр Григорьевич Столетов в 1899 году. Результаты этих работ оказались очень плодотворными. Он открыл и изучил известные законы фотоэффекта. Кроме того, Столетов первым сконструировал фотоэлемент.

Как известно, в 1897 году был открыт электрон. С ним тут же связали оптические колебания в атоме, как вы помните. И через пару лет оказалось, что фототок, возникающий при освещении катода фотоэлемента, состоит из частиц с тем же отношением заряда к массе, что и у электрона.

Далее, Ладенбург показал, что энергия фотоэлектрона не зависит от интенсивности света, но пропорциональна его частоте. И здесь, в 1905 году, уже появляется известная формула Эйнштейна для фотоэффекта. В этой формуле присутствует важная гипотеза. Как вы знаете, есть вероятность для многофотонного фотоэффекта, который требует уже другой формулы.

В формуле Эйнштейна, помимо работы выхода, зависящей от материала, присутствует постоянная Планка и масса электрона. Так как масса электрона была к тому времени уже известна, то оказалось возможным проверить правильность этой формулы. Такая проверка была проведена в 12-16 годах. Помимо прочего, из этой формулы можно было получить значение постоянной Планка, что было вторым по счету способом ее определения.

В 1909 году Штарк высказался о фотоэффекте, принимая во внимание специальную теорию относительности. По его словам, фотон не может иметь только лишь энергию, он должен также обладать и импульсом. Причем, из соображений СТО легко показать связь между энергией и импульсом фотона. В итоге получалась безмассовая частица, имеющая импульс, пропорциональный энергии:

$$p = \frac{h\nu}{c}$$

Эти идеи впоследствии были исследованы экспериментально американским физиком Комптоном, который открыл эффект, носящий его имя. Оказывается, что

фотоны могут взаимодействовать с отдельными заряженными частицами, рассеиваясь на них и меняя свою частоту.

Но здесь важно отметить следующий момент, который не должен вас путать. В начале 20 века рассматривались довольно простые конструкции – например, взаимодействие одного фотона и одного электрона. Рассмотрим низкочастотный предел. Заметьте, что никто не говорит о проявлении эффекта Комптона для радиоволн (даже для видимого света). Он проявляется только для рентгеновских и гамма лучей.

Теперь будем рассматривать нейтральную в целом систему заряженных частиц и проходящее через эту систему электромагнитное излучение. В этом случае, по представлениям того времени, никакого смещения падающего излучения по частоте не должно быть. Что, конечно же, неверно. Если мы говорим о сложной системе зарядов, взаимодействующих через самосогласованное поле, то такая система (плазма) была подвергнута детальному исследованию намного позже, в 1950ых годах. Так вот, в космической плазме или в газовой плазме, используемой в токамаках, квантовые эффекты совершенно несущественны. Но при этом эффект Комптона наблюдается, причем наблюдается именно классический вариант эффекта. Таким образом, утверждение, согласно которому эффект Комптона связан с проявлением квантовых свойств света, оказывается неверным. Это справедливо только для взаимодействия отдельных частиц.

Итак, история утверждения фотоэффекта оказывается тесно связана с историей утверждения замечательных идей Эйнштейна, который «реабилитировал» дискретные свойства света. Это было удивительно, ведь до этого волновая теория целое столетие считалась общепризнанной. Электродинамика Максвелла прекрасно описывала большинство экспериментов. Поэтому в идее возвращения к корпускулярной концепции Ньютона было заложено определенное противоречие.

Идея корпускулярно-волнового дуализма света

Это противоречие было рассмотрено Эйнштейном. Мы часто говорим о корпускулярно-волновом дуализме. И вы должны понимать, что эта концепция двояка – она может быть отнесена как к частицам света, так и к частицам материи. Дуализм заключался в дополнении волновой теории некоторыми корпускулярными свойствами. В 1909 году публикуется работа Эйнштейна «К современному состоянию проблемы излучения», в которой еще раз выводится формула Планка (чем занимались многие, как мы уже обсудили).

В своей работе Эйнштейн показал, что в системе элементарных осцилляторов имеет место динамический хаос – ведь осцилляторы между собой независимы и не

коррелированы. И это связано не только с некогерентностью их излучения, но и с естественной поляризацией света, имеющей некое распределение по направлению.

Такая система является статистической. Как следствие, можно посчитать как среднюю энергию осциллятора, но и ее квадратичную флуктуацию. Похожими вычислениями Эйнштейн уже занимался в 1905 году, работая над броуновским движением. В итоге у него получалась следующая формула для флуктуации средней энергии в единице объема V , в частотном диапазоне $\nu \div \nu + d\nu$ (в состоянии термодинамического равновесия):

$$\overline{(E - \bar{E})^2} = \bar{E}h\nu + \frac{c^3 \bar{E}^2}{8\pi\nu^2 V d\nu}$$

Таким образом, если система подчиняется формуле Планка, то результат можно представить в виде суммы двух выражений. Первое слагаемое может быть получено тем же способом, который использовал Эйнштейн в работе 1905 года, когда он просто рассматривал газ фотонов.

Второе слагаемое может быть получено, грубо говоря, методом Рэлея. Рассматривая систему стоячих волн, мы забываем о квантовой дискретности. Тогда, чисто классически, можно получить флуктуацию энергии волн, которые находятся в равновесии с осцилляторами. Этот вклад не содержит постоянной Планка и является следствием волновых представлений на приросту света.

Конечно, к выражению выше можно относиться как к всего-навсего формуле с двумя слагаемыми, в одном из которых постоянная Планка содержится, а в другом – нет. Но Эйнштейн пошел дальше. Он формулирует принципиально новое утверждение, которое впоследствии получило название «корпускулярно-волновой дуализм». Свет, на самом деле, является не волной и не частицей, а чем-то средним. В определенной ситуации проявляются волновые свойства, которые доминируют в области низких частот. Что касается высоких частот, то, начиная с гамма-излучений, волновые свойства практически не проявляются. Таким образом, корпускулярно-волновой дуализм света возник в 1909 году. Обратите внимание на то, что речь об аналогии с частицами зашла намного позже.

Применение идеи квантов – новая механика

В 1911 году краковский физик Натансон опубликовал работу, в которой он вернулся к подробному рассмотрению статистики, которую использовал Планк в выводе своей замечательной формулы. Там использовались новый метод подсчета

комплексный и гипотеза равновероятности. При этом возникли некоторые нюансы, которые в итоге свелись к формулировке двух ситуаций.

В первой из них «приемники» энергии возможно различить между собой, а во второй – невозможно. Планк, при выводе своей формулы, использовал второй вариант. «Приемники» энергии нельзя различать, и при этом образуются «моды соединения». Мы можем различать только группировки количеств квантов энергии (моды соединения) – то есть, мы можем только сказать, сколько квантов сгруппировалось вместе (10, 20, и т.д.). В пределе же Эйнштейна (классический газ) «приемники» энергии, осцилляторы, можно различать и считать их классическими.

Такая особенность статистики, заключающаяся в наличии двух подходов, дающих разные результаты, была уже более-менее выясненной к началу Первой мировой войны. К этой проблеме вернулись только в двадцатые годы, когда возникли статистика Бозе-Эйнштейна и статистика Ферми-Дирака.

Продолжая обсуждать историю развития квантовой теории, обязательно надо упомянуть Сольвеевский конгресс в ноябре 1911 года. Эрнст Сольвэ, бельгийский меценат, организовал конгресс с участием самых выдающихся физиков того времени. Именно там сформировались принципиальные ключевые положения квантовой теории.

На самом деле, дело даже было не в том, что в одном месте собралось много замечательных людей, но в том, что сам момент организации конгресса был выбран очень удачно. Как вы помните, именно в 1910 году Лоренц доказал, что нужно переделывать основные положения либо механики, либо электродинамики – по-другому согласовать формулу Планка с основами классической физики нельзя.

Детально обсуждать весь Сольвеевский конгресс мы не будем, но отметим следующие моменты. К этому времени Планк уже сменил свою позицию. Он понял, что речь идет о фундаментальной модификации, в первую очередь, механики.

Планк высказал следующую идею. Осциллятор обладает некоторой энергией (функцией Гамильтона):

$$E = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}\beta q^2$$

Где β – коэффициент жесткости. При этом частота колебаний определялась отношением β/m .

При рассмотрении осциллятора в фазовом пространстве (в переменных p, q), в последнем возникает капля $dpdq$. Распределение в фазовом пространстве является

непрерывным, поэтому эту каплю мы можем вводить как угодно. С течением времени она, по траекториям Гамильтона, будет как-то эволюционировать. Введение квантовых принципов сводится к дискретности ячеек:

$$\iint_{E_n}^{E_{n+1}} dp dq = h$$

Формула выше квантует площадь фазового пространства между E_n и E_{n+1} - n -ым и $n+1$ -ым уровнями энергии соответственно. Именно она называется первым правилом квантования.

В докладе Планка мы видим два принципиальных момента. Во-первых, был сделан окончательный вывод о необходимости перестройки классической механики. Во-вторых, возникли ячейки в фазовом пространстве, которое до этого считалось непрерывным.

Обратите внимание на то, что если новую механику воспринимать как модификацию допустимых состояний фазового пространства, то можно решить многие задачи. Например, можно проквантовать атом (подробнее это обсудим на следующей лекции). Любопытно, что, если проквантовать атом Томсона (кекс с изюмом), то получится, на удивление, правильный спектр водорода. Значит, из чисто спектральных соображений было невозможно доказать существование ядра. Это делает результаты опытов Резерфорда довольно нетривиальными, с точки зрения его современников.

Другой результат – сам Планк вывел среднюю энергию осциллятора, исходя из дискретности набора энергий (заменяв интеграл конечной суммой).

Теплоемкость твердого тела

Обсудим другие применения квантования. В данном случае, правда, речь пойдет о применении статистики в теории теплоемкости твердого тела. В 1907 году Эйнштейн опубликовал работу «Теория излучения Планка и теория удельной теплоемкости». В этой работе было две части. В первой из них имелась догадка Эйнштейна, объясняющая зависимость теплоемкости различных статистических систем (газов и твердых тел). К тому времени было известно, что закон Дюлонга-Пти нарушался в области низких температур. Выяснилось, что при малых температурах удельная теплоемкость тоже падает. Эйнштейн предложил ввести квантование колебаний молекул.

Но здесь надо иметь в виду следующее. Теория Эйнштейна используется только в учебных курсах. В серьезных случаях применяется теория Дебая. Причем часто

считается, что Дебай высказал идею стоячих волн в 1912 году. Я хотел бы вас в этом разубедить. На самом деле, систему стоячих волн в твердом теле первым предложил Больцман в 1872 году. Дебаю же удалось получить точное поведение теплоемкости при низких температурах.

Лекция 12. История строения атома. Возникновения квантовой механики

План лекции:

Развитие теории строения атома.

Аргументы в пользу сложного строения атома:

- химические аргументы (периодичность элементов, Менделеев)
- радиоактивность
- открытие электрона
- исследования спектров
- эффект Зеемана

Спектры:

- 1885 – Бальмер предложил формулу для *спектра водорода*:

$$\lambda = \text{const} \cdot \frac{m^2}{m^2 - 2^2}$$

- 1890 – Ридберг привел более общую формулу (применимую и к щелочным металлам).
- 1908 – Ритц четко формулирует «*комбинационный принцип Ритца*»:

$$\omega_{nm} = T_n - T_m$$

Где n, m – целые числа, а T_n – «спектральные термы». Наступил кризис в попытках классического моделирования такого закона.

Атомные модели:

- Вильям Томсон, середина 19 века – вихревая модель

Модели, включившие электрон в состав атома:

- 1901 – Перрен, планетарная модель, изложенная в популярной лекции.
- Дж. Дж. Томсон, модель «пудинга с изюмом». Моделирование лоренцевой квазиупругой силы + идея «слоевого» заполнения электронами.

Трудность модели Дж. Дж. Томсона:

- Объяснение эффекта рассеяния Э. Резерфордом (1911).
- Объяснение эффекта Штарка (1913).
- Небольшие отклонения в результатах квантования атома Томсона, по сравнению с квантованием атома Резерфорда.
- Модель Нагаока (1903). Сатурнианские кольца + поперечные колебания.
- Модель Никольсона, астрофизика из Кембриджа (1912). Включала квант h :

$$\frac{E}{nh} = \omega$$

- 1911 – Бьеррум, на основе метода Планка, ввел квантование вращательной энергии молекул + объяснение молекулярных спектров поглощения.

- 1905 – Вин обратил внимание на основной недостаток планетарных моделей – за время порядка одного оборота должно произойти полное излучение энергии электрона.

Модель атома Бора, 1913 год:

Основная исходная идея Бора – объяснение результатов Эрнеста Резерфорда 1912 года.

- Исходные проблемы:
 - Устойчивость (...Вин)
 - Неоднозначность размеров орбиты и значений периодов обращения

Обе эти проблемы Бор попытался решить через использование постоянной h . Не объяснение природы h через модель атома, а наоборот!!

- Постулат: существование дискретного набора стационарных (устойчивых орбит)
- Комбинационный принцип Ритца

Основные особенности подхода Бора:

- Отказ от классической механики и электродинамики в полном объеме.
- Преобраз принцип соответствия для фиксации орбит: при захвате электрона половина классической частоты обращения по соответствующей орбите равна частоте излучения. Отсюда позже будет выведено квантование момента импульса (а не наоборот!!).

Проверка и предсказания:

- Спектроскопические подтверждения для водородоподобных атомов. Эффект приведенной массы, т.е., влияние массы ядра на спектр.
- Опыты Франка и Герца (1914). Ударное воздействие электронов на пары ртути.
- Неупругие столкновения при определенных дискретных значениях энергии электронов.
- Баланс энергии электронов и излучения.

Развитие правил квантования

- 1911 – Пуанкаре и Планк. Ячейки в фазовом пространстве (1 ст.свободы)

$$\iint dp dq = h$$

- 1915 – Планк. Для нескольких степеней свободы. Разбиение пространства поверхностями интегралов движения $F(p_k, q_k) = \text{const}$ на области объемом h' .
- 1913-1915 – Зоммерфельд, независимо от Планка:

$$\oint p_k dq_k = n_k h$$

- 1915 – Вильсон и Ишивара демонстрируют общность подходов Бора и Планка к квантованию.

Адиабатический принцип и квантовые условия:

- Адиабатический принцип для квазипериодических систем впервые ввел в физику Больцман в 1866 году.
- Независимо это же сделал Клаузиус в 1871 году. Он говорил об адиабатическом инварианте.
- 1911 – Лоренц и Эйнштейн обсуждали проблему маятника переменной длины на Сольвеевском конгрессе в свете проблемы квантования.
- Пауль Эренфест продемонстрировал сохранение адиабатичности в квантовой области. Он показал, что сохранение «классического» закона Вина $\nu^3 F(\nu/T)$ связано с тем, что ν/T и ε_ν/ν – адиабатические инварианты.

Отсюда возник метод нахождения стационарных состояний «деформированных» систем из планковского осциллятора.

- В 1916 году Эренфест показал согласование условий Зоммерфельда с адиабатическим принципом.
- Трудности подхода Эренфеста: Переход через состояние с $T \rightarrow \infty$, маятник-ротатор, нарушение адиабатичности, разные координаты-разные квантовые условия.

Принцип соответствия:

Принцип соответствия – эвристический принцип, а не аналогия.

- 1918 – Бор опубликовал работу «О квантовой теории линейчатых спектров». Большие действия – совпадение частот излучения (квант.) с частотами обращения (класс.). Неполнота «старой квантовой теории».
- 1916 - знаменитая работа Эйнштейна «Испускание и поглощение излучения по квантовой теории». Эйнштейн еще раз вывел закон Планка – из идеи уровней энергии и понятия о вероятностях переходов между ними.

$$A_m^n dt \text{ – вероятность естественного перехода}$$
$$\left\{ \begin{matrix} B_m^n \rho dt \\ B_n^m \rho dt \end{matrix} \right\} \text{ – вероятности индуцированных переходов}$$

- Для вывода Эйнштейн использовал условие сохранения гиббсовского равновесия и закон Вина.
- Новый подход – интерпретация вероятностей. Идея спонтанного (беспричинного) излучения.
- Бор:
 - Ввел сам термин «спонтанное излучение»
 - Связал априорные вероятности Эйнштейна с коэффициентами Фурье в многомерном разложении дипольного момента – идея правил отбора.

Создание матричной механики.

Вернер Гайзенберг:

Май-июнь 1925. Молодой Вернер Гайзенберг публикует статью «О квантовомеханическом истолковании кинематических и механических соотношений».

- Философские идеи Бора (адекватность концепций – позитивистский дух; идея использования адекватных теоретических методов).
- Эвристическое использование идеи Эйнштейна – при создании СТО Эйнштейн операционалистски вводил понятия, ранее казавшиеся априорными – одновременность, метод измерения длин и временных интервалов. Понятие «наблюдаемой» величины.
- Задача, приведшая Гайзенберга к его фундаментальным выводам – атом в периодическом внешнем поле (теория дисперсии).

Идеи Гайзенберга:

- Идея «новой кинематики» - $x(t), p(t)$ заменить непосредственно наблюдаемыми в эксперименте величинами – частоту, интенсивность, поляризацию излучения.
- Принцип соответствия перенести в фундамент теории, а не использовать как дополнительную уточняющую идею, как это было в «старой квантовой теории»:

$$x(t) = \sum_m a_m e^{im\omega t} \Rightarrow q_{mn} e^{i\omega_{nm}t}$$

- Гайзенберг рассмотрел ангармонический осциллятор с квадратичной нелинейностью:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x + \lambda x^2 = 0$$

- Квантовая задача приводит к уровням энергии:

$$W = \frac{h\omega_n}{2\pi} \left(n + \frac{1}{2} \right)$$

- Энергия основного состояния не равно нулю!
- 27 сентября 1925 года. Борн, Иордан, «О квантовой механике» - теория эрмитовых матриц
- Ноябрь 1925 года. Борн, Иордан, «О квантовой механике II». Проблема отыскания стационарных уровней энергии эквивалентна задаче диагонализации матрицы H , т.е., речь идет о решении уравнения:

$$\det \|\hat{H} - \lambda \hat{I}\| = 0$$

- В конце 1925 года Борн и Винер (Винер – специалист по теории линейных операторов) записали матричную механику Гейзенберга на языке линейных операторов. Такой подход позволил подступиться к задаче с непрерывным спектром. Но они не догадались, что

$$p = \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial q}$$

- Ноябрь 1925 года. В Англии Поль Дирак пришел к выводу, что переход от классической механики к новой механике Гейзенберга означает замену обычной алгебры действительных чисел для классических величин p и q на *новую некоммутативную алгебру q -чисел*. При этом классические скобки Пуассона заменялись на квантовые.
- Несколько позже, в начале 1926 года, Дирак и Паули (независимо) решили *задачу атома водорода*, причем Паули дал анализ эффекта Штарка. Это был первый конкретный прогресс по сравнению с теорией Бора.

Возникновение волновой механики:

Предпосылки:

- Распространение оптико-механической аналогии Гамильтона (1828-1837гг) на динамику электрона.
- В электродинамику корпускулярно-волновой дуализм проник раньше, начиная с работы Эйнштейна 1909 года, в которой описывался дуализм для фотонов. Экспериментаторы также констатировали корпускулярные свойства рентгеновский лучей.

Луи де Бройль в 1923-1924 годах, проводя анализ с учетом релятивистской трактовки времени, пришел к выводу, что покоящейся массивной частице (например, электрону), можно сопоставить периодический процесс с частотой $\nu_0 = mc^2/h$. Переходя к движущейся системе отсчета, получим волну, у которой:

$$\nu = \frac{E}{h}, \quad k = p \frac{2\pi}{h}$$

- Обоснование правил квантования для атома водорода как условий для возникновения стоячих волн подобного типа:

$$2\pi r = \lambda n \Rightarrow \oint p dq = nh$$

- *Позже* возникла идея дифракционного опыта для подтверждения существования фазовых волн:
 - Эксперимент Дэвиссона и Джермера (США, 1927). Рассеяние электронов на монокристалле никеля.
 - Эксперимент Джорджа Паджета Томсона в 1927 году. Рассеяние электронов на тонких пленках.

В прошлый раз мы с вами начали обсуждать возникновение квантовой теории. Конечно же, обсуждаемые нами моменты были лишь картинками из цельной истории. Мы рассматриваем вопросы, которые, во-первых, имеют важное общее значение, а во-вторых, могут поделиться с нами некоторой моралью, которую мы уже можем использовать в нашем мышлении и нашей деятельности.

Рассматриваемая сегодня нами тема очень важна, поскольку возникновение квантовой механики оказало огромное влияние на дальнейшее развитие физики. В прошлый раз мы рассмотрели группу вопросов, связанных с проблемой излучения твердого тела и концепцией фотона. Сегодня мы будем обсуждать историю строения атома и возникновение квантовой механики.

Прежде чем приступить к обсуждению, я хочу отметить следующее. С моей точки зрения, существует самый оптимальный источник информации, которая будет в дальнейшем здесь излагаться – я говорю об учебнике Макса Джеммера, «Эволюция принципов квантовой теории». Так как наш курс не претендует на полноту изложения истории развития квантовой механики, то эту книгу я настойчиво вам рекомендую.

Развитие теории строения атома

Как вы помните, самое начало 20 века (1902-1905), с одной стороны, было эпохой кризиса молекулярно-кинетической теории Максвелла-Больцмана. Но в это же время, в результате определенных событий, ситуация резко меняется, и МКТ из гипотетической теории превращается в «пособие по руководству». Кроме того, речь зашла уже не только о существовании атомов, но и об их строении. Такое резкое изменение научной проблематики здесь очень важно.

Мы с вами уже говорили об исследовании непрерывных спектров, в частности, о спектре излучения твердого тела. Еще в начале 19 века обратили внимание на специфику спектров, на наличие дискретных полос и линий. Появилась идея идентификации химического состава с помощью таких линий.

Давайте перечислим аргументы в пользу сложного строения атомов. Одни из них являются весомыми и в наше время и имеют корни более глубокие, чем конец 19 века. Но, несмотря на это, как я уже говорил, в существовании атомов все равно многие сомневались.

Итак, в конце 19 века была открыта радиоактивность. Далее, наблюдалась закономерность в периодических свойствах химических элементов. В 1897 году был открыт электрон, о чем мы довольно подробно говорили. Наконец, в результате исследования эффекта Зеемана стало ясно, что электрон, скорее всего, является той самой частицей, колебания которой и должны обеспечивать существование оптических спектров. Значит, он должен входить в атом, откуда следует вывод о сложном строении атома.

Что касается исследований дискретного спектра, то во второй половине 19 века обратили внимание на закономерности в расположении линий. Оказалось, что

положение некоторых линий описывается численными рядами. Одним из первых на закономерности в спектре водорода обратил внимание швейцарский физик Бальмер. Обратите внимание, что Бальмер был любителем нумерологии. Сегодня мы с вами к астрологии, нумерологии относимся довольно критично, но, тем не менее, такое увлечение помогло Бальмеру найти количественную закономерность:

$$\lambda = \text{const} \cdot \frac{m^2}{m^2 - 2^2}$$

После этого ситуация начала усугубляться. Активизировались исследования, в результате которых для спектральных закономерностей устанавливались все более и более общие правила. Вершиной этих результатов является 1908 год, в котором появляется знаменитый комбинационный принцип Ритца. Согласно ему, частоты в спектре имеют два индекса. Их можно получить в результате комбинирования так называемых спектральных термов, каждый из которых уже имеет один индекс:

$$\omega_{nm} = T_n - T_m$$

Атомные модели

Хотя отношение к той же теории Максвелла-Больцмана было довольно разным, но Вильям Томсон, критиковавший МКТ, все же предполагал существование атомов в виде континуальных вихревых моделей. Сейчас такую модель можно представить в виде многомерных солитонов, особых конструкций в пространстве, которые обладали очень большим числом степеней свободы (именно поэтому Томсону не нравилась теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы).

Только в начале 20 века дело дошло до конкретных экспериментальных исследований. Первой возникла модель, лежавшая на поверхности – планетарная модель. Полезно знать, что первым эту модель предложил замечательный французский физик Перрен, который прославился экспериментальным подтверждением теории броуновского движения Эйнштейна. В его идеях, сформулированных в популярных лекциях, присутствовал центральный положительный заряд, вокруг которого вращается некоторое количество отрицательно заряженных частиц. По сути, модель атома Перрена соответствовала устройству Солнечной системы, с заменой гравитационных сил на кулоновские силы.

Далее, обычно говорят, что в 1905 году модель такого типа была забракована Вином, который обратил внимание на следующее. Не то, чтобы такая конструкция не могла быть устойчивой, ведь у планковских осцилляторов была такая же проблема – они, излучив свою энергию, должны были бы остановиться. Но все же осциллятор, даже после остановки, не прекращал быть осциллятором. В то время как оценки Вина

показывали, что энергия атома излучалась бы электроном за один оборот. То есть, спустя один оборот атом должен был уже упасть на центр. Такую критику, конечно, было очень трудно преодолеть.

Параллельно возникает другая модель, тоже известная со школьной физики – модель Дж. Дж. Томсона, «пудинг с изюмом». Такая конструкция представляла собой не сконцентрированный в центре положительный заряд, а заряд, размазанный по масштабу атома, 10^{-8} см. Внутри этого заряда находились частицы, электроны. Такое расположение электрона позволяло объяснить эффект Зеемана.

Здесь есть интересный момент. Как вы помните, для электронной теории Лоренца очень важным условием было наличие квазиупругой силы в строении атомов и молекул. Помимо электрического поля, на заряженную частицу воздействовала и эта квазиупругая сила, удерживающая ее в определенном состоянии. И в рамках модели Томсона эта сила возникала естественным образом – как результат кулоновского взаимодействия электрона и размазанного по атому положительного заряда. Таким образом, модель Томсона согласовывалась с лоренцевской теорией.

Однако, стоит отметить следующее. Если бы дальнейшие исследования были чисто спектральными, то модель Томсона утвердилась бы еще сильнее. Ведь применения квантования фазового пространства, предложенного в 1911 году, к томсоновской модели атома водорода, привело, на удивление нам сегодня, к подтвержденному экспериментом спектру. Правда, совпадение заканчивалось лишь в первом приближении. Более детальное изучение спектра, а также исследование эффекта Штарка, выявляли различия.

Далее, вплоть до атома Бора, предложенного в 1913 году, выдвигались разные идеи. Некоторые из них (например, японский физик Нагаока) предлагали модифицировать планетарную модель, увеличив количество вращающихся вокруг центра частиц (получить аналог колец Сатурна). Кстати, современная электродинамика говорит о том, что такая система уже могла бы быть устойчивой. Спектральные линии предлагалось объяснить поперечными колебаниями таких колец. Астрофизик Никольсон попытался наложить квантовые условия на такую модель.

Отличием всех этих ранних моделей было то, что предлагавшие их исследователи действовали так же, как и в физике излучения черного тела. Там брали осцилляторы (изначально – классические), на которые впоследствии накладывались дополнительные квантовые условия.

В 1911 году принцип квантования применили к вращательному движению. Оказалось, что таким образом можно было объяснить молекулярные спектры поглощения.

Модель атома Бора

В 1913 году Бором была предложена еще одна модель атома, которая вам хорошо известна. Однако нам все же стоит расставить акценты на существенными моментами.

Бор, будучи в 1911-1912 годах молодым физиком, работал у Томсона. Поэтому он пытался теоретически объяснить именно эту модель. Однако с Томсоном Бор не поладил, и тот сам предложил ему сотрудничать со своим «конкурентом», Эрнестом Резерфордом. Здесь мы упомянем знаменитые экспериментальные исследования Резерфорда, посвященные как строению атома, так и радиоактивности. В 1912 году Резерфорд интерпретировал свои результаты введением атомного ядра. Это ядро, по Резерфорду, обладало крайне малыми размерами (по сравнению с атомом) и высокой плотностью. Вокруг ядра Резерфорд поместил вращающиеся по орбитам электроны. Но, будучи экспериментатором, он не смог теоретически обосновать свою модель.

На эту задачу обратил свое внимание Нильс Бор. Ему нужно было решить проблему устойчивости, которую выдвинул еще Вин. Помимо этого, возникала еще одна проблема. В орбитальной модели возникает неоднозначность соотношения между радиусом орбиты и периодом обращения. Конечно, можно было бы взять размер орбиты, совпадающий с размером атома, но такой ход был довольно искусственным – непонятно, почему надо брать именно такой размер.

Планк пытался объяснить дискретность энергии из исследований явления теплового излучения. Бор же поступил наоборот – он использовал постоянную Планка для объяснения устойчивости системы. Такой подход был оригинальным – до Бора его никто не применял. Бор, скомбинировав массу электрона, его заряд и постоянную Планка, получил постоянную, называемую боровским радиусом. Важным было то, что этот радиус совпал по порядку с известным тогда размером атома.

В работе 1913 года Бор публикует 2 известных постулата – о наличии стационарных уровней, на которых система не излучает, и об излучении, частота которого связана с разностью энергий между уровнями перехода (комбинационный принцип Ритца). Тем не менее, в этой работе имеются некоторые нюансы.

Во-первых, надо отметить характерность подхода Бора, заключающуюся в том, что Бор очень своеобразно комбинирует классическую механику и электродинамику с

дополнительными квантовыми условиями. При расчете стационарных уровней он, с одной стороны, рассматривает классическую систему с кулоновскими силами. С другой стороны, он запрещает (по 1 постулату) классическое излучение. При этом тот самый скачок, во время которого происходит излучение, классическая физика не объясняет вообще никак.

Во-вторых, во многих учебниках при получении параметров стационарных уровней используют квантование момента импульса электрона. Так вот, в своей первой работе Бор не квантовал момент импульса. Но он использовал прообраз важного принципа, которым он впоследствии часто пользовался – принципа соответствия. Причем, с точки зрения современной физики, у принципа соответствия есть два смысловых значения.

С точки зрения первого значения, принцип соответствия является, скорее, философским и методологическим утверждением. Согласно ему, в процессе эволюции физических теорий, новые теории должны включать в себя старые, как некие предельные случаи – между ними должно быть соответствие.

В квантовой теории же принцип соответствия, будучи уже эвристическим, имеет другой смысл. Согласно ему, новая теория должна удовлетворять определенным требованиям. В данном случае, требование формулируется следующим образом. Известно, что частоты обращения электрона вокруг ядра не имеют никакого отношения к частотам излучения. Тем не менее, на очень высоких орбитах захват электрона ядром происходит с сохранением высоких энергий. Бор утверждает, что на таких орбитах частота обращения уже связана определенным образом с частотой излучения. При захвате электрона на такую орбиту излучается фотон, частота излучения которого равна половине частоте обращения.

Идея существования стационарных уровней была вскоре экспериментально проверена в опытах Франка и Герца. В этих опытах исследовалась воздействие бета-лучей на пары ртути. Оказалось, что действительно наблюдается некая дискретность состояний.

Развитие правил квантования

Развитие правил квантования шло параллельным курсом. Как мы уже упоминали, на первом Сольвеевском конгрессе (в 1911 году) выяснилось, что квантовая теория имеет фундаментальное значение, и что классическая механика, электродинамика и статистика требуют серьезной переработки. Тогда же ввели ячейки в фазовом пространстве, сначала для одной степени свободы:

$$\iint dp dq = h$$

Дальше попытались рассмотреть систему с несколькими степенями свободы, где возникли определенные трудности. Но мы можем ввести интегралы движения и поделить ими пространство на слои (в случае гармонического осциллятора – эллипсы). И площадь в фазовом пространстве между этими слоями должна быть в точности равна h . В случае системы с несколькими степенями свободы надо вводить интегралы движения, которые связывают пару обобщенных координат и импульсом, $F(p_k, q_k) = \text{const}$. Это проделать достаточно сложно. К тому же, непонятно, какие именно пары обобщенных координат брать.

В дальнейшем выяснилось, что в этом вопросе существенную роль играет разделение переменных в записи уравнения Гамильтона-Якоби. Альтернативный подход, связанный с введением непосредственно квантования, был развит Зоммерфельдом вскоре после работы Бора. Основные результаты этого подхода были получены в 1915 году, причем не только Зоммерфельдом, но и Вильсоном и Ишиварой. Оказалось, что имеет место немного другое квантование:

$$\oint p_k dq_k = n_k h$$

Ишивара доказал, что, несмотря на разные формулы, подходы Планка и Вильсона эквивалентны и соответствуют работе Бора 1913 года. Таким образом, общий подход был одинаков – рассматривалась классическая система, и на нее накладывались квантовые условия определенным образом – либо в форме Планка, либо в форме Зоммерфельда-Вильсона.

Но что собой представляли эти конструкции? Откуда берется площадь в фазовом пространстве? Смысл интеграла $\oint p_k dq_k$ был не совсем понятен. Кстати, именно таким же было непонимание физического смысла константы h первое время – она ведь не была не энергией, не импульсом, а чем-то специфическим – константой действия, с точки зрения теоретической механики. Так вот, у правил квантования и интерпретации константы h есть целая история.

Адиабатический принцип и квантовые условия

Обратите внимание на следующий момент. Сейчас в теоретической механике есть довольно обычная вещь – адиабатические инварианты. Они, быть может, не так часто встречаются в учебных курсах, но при применении механики они играют важную роль, особенно при рассмотрении квазипериодических систем. Мы уже говорили, что впервые эти инварианты ввел Больцман в 1866 году в своей дипломной работе.

Сейчас, для иллюстрации применения адиабатных вариантов, используют довольно простую задачу – задача, связанные с маятником переменной длины. Что будет происходить с колебаниями математического маятника, если понемногу вытягивать нить? Энергия, понятное дело, не сохраняется. Но зато сохраняется соответствующий адиабатический инвариант, которые есть отношение энергии к частоте. А ведь во времена Ньютона такие задачи решать не умели.

Вообще говоря, и сам Больцман такую задачу не стал анализировать, он лишь ограничился введением этого самого инварианта. Впервые эту задачу рассмотрели Лоренц и Эйнштейн в 1911 году, на том самом Сольвеевском конгрессе. Получается интересный момент – развитие классической механики, в каком-то смысле, оказывается стимулированным вопросом из квантовой теории.

Стоит отметить, что сам термин «адиабатический инвариант» Эйнштейн и Лоренц не применяли. К этому вопросу обратился ученик Больцмана, Паули Эренфест. Он, будучи знакомым с работой Больцмана, указал на то, что та конструкция, которая сохраняется в вышерассмотренной задаче, и есть адиабатический инвариант. Далее, Эренфест показал, что сам принцип квантования может быть рассмотрен как применение адиабатических инвариантов.

Рассмотрим, например, закон смещения Вина. Функция частоты, которую искали еще в 19 веке, представляла собой выражение $\nu^3 F(\nu/T)$. Аргумент этой функции, отношение ν/T , и был адиабатическим инвариантом. Таким образом, физический смысл квантования понемногу стал проясняться.

Далее, обратим внимание на то, что методом Планка (введением ячеек в фазовом пространстве) можно было рассматривать не только гармонический осциллятор с параболической кривой энергии, но и любую другую систему с мягкой деформацией параболы. Однако, есть ограничения. Например, нелинейные колебания маятника мы проквантовать сможем. Но, как только он переходит в ротатор (маятник вращается через верхнее положение), то период колебания обращается в бесконечность. В классической механике такой переход называется переходом через сепаратрису, и он ставит нас в тупик. Тем не менее, идеология преодоления таких трудностей понемногу формировалась.

Принцип соответствия

Как мы уже обсудили, принцип соответствия вводит Бор в 1913 году. Но в 1918 году им же сделаны некоторые обобщения, которые основаны на работе Эйнштейна 1916 года «Испускание и поглощение излучения по квантовой теории». Эйнштейн в этой работе еще раз выводит формулу Планка, но уже с позиции квантовых переходов.

Он рассматривает систему с двумя уровнями энергии и вводит знаменитые понятия – вероятность спонтанного (нестимулированного) перехода $A_m^n dt$ и вероятность индуцированных переходов $B_m^n \rho dt$, $B_n^m \rho dt$ (стимулированное излучение и поглощение). Далее, Эйнштейн применил гиббсовскую статистику для количества состояний на верхнем и нижнем уровнях. И в результате комбинации всего этого у него получилась формула Планка.

Бор подошел к этому вопросу несколько иначе, чем Эйнштейн. У того получался аналог классической статистики, в котором состояния системы описывались не механически, а статистически (так как отсутствует полная информация об исходном состоянии системы). Эти подходы совершенно разные, несмотря на одинаковые количественные соотношения и одинаковые формулы. Такое различие в подходах Эйнштейна и Бора первый раз проявилось именно здесь. Первый считал, что описание переходов имеет сугубо вероятностный характер, но наличие вероятности связано лишь с неполнотой информации. А Бор предлагал считать вероятностное описание фундаментальным, то есть причинное описание в духе классической динамики невозможно в принципе.

В итоге, Бор вводит понятие «спонтанного излучения». В то же время, он расширяет понятия коэффициентов Эйнштейна для вероятности переходов. Как вы знаете, в атомной физике в дальнейшем появляется идея разложения дипольного момента в ряд, что не только позволяет рассчитать вероятности переходов, но и приводит к известным правилам отбора.

Создание матричной механики

Вернер Гайзенберг

В середине двадцатых годов начинает формироваться квантовая механика. Здесь хотелось бы расставить акценты в нужных местах. Молодой последователь Бора, немецкий физик Вернер Гайзенберг, обращается к атомной физике и к вопросу взаимодействия атомов с излучением – к тому, что мы называем молекулярной дисперсией. Он пытается ее рассмотреть с другой стороны. И здесь стоит отметить методологически-философские особенности подхода Гайзенберга к этой проблеме.

Ему не понравилась структура существующей теории, согласно которой мы сначала решали классическую задачу, со всеми ее атрибутами. При этом, в том числе, возникала эллиптичность орбиты электрона, как решение задачи Кеплера. Затем мы применяем метод квантования, при этом возникают дипольные величины, константы переходов и т.д.. Такая последовательность, с одной стороны, приводила к

правильному ответу, но при этом эллиптические траектории нигде себя не проявляют. Экспериментально их наблюдать нельзя.

И здесь мы видим еще один пример влияния философии на развитие физики. Позитивистский дух, оказавший влияние на развитие как классической механики, так и молекулярно-кинетической теории, продолжал отвечать состоянию менталитета физиков конца 19 – начала 20 веков. В том числе, этот дух оказал влияние на сознание Гайзенберга. Он был знаком с фундаментальными работами Эйнштейна, в том числе и по специальной теории относительности.

На него произвело сильное впечатление то, как Эйнштейн показал нетривиальность тех понятий, которые до него считались априорно понятными и не требовавшими специальных обоснований (одновременность, методы измерения длины и временных интервалов). К числу таких величин также можно отнести понятие наблюдаемой величины. Одновременность – она наблюдаема или нет? Длина – это величина универсальная и абсолютная, или ее надо привязать к определенным условиям наблюдения?

Такие идеи наблюдаемости, идеи инструментального определения метода измерения каких-либо величин, произвели сильное впечатление на Гайзенберга. Он решил распространить эту проблему и на другие понятия. Он говорил, что никакие точные траектории и законы движения электрона в атоме, следующие из классической механики, не являются наблюдаемыми, их никто не видит. Невозможно проверить, по какой орбите перемещается электрон, то есть все эти орбиты условны.

Но есть величины, которые проверить можно – поляризация линий и частоты излучения. И у Гайзенберга возникла идея – ввести квантование на самом фундаментальном уровне. Во-первых, он хотел избавиться от точных (в обычном смысле) зависимостей координат и импульсов от времени и заменить их амплитудами линий поляризаций и частотами излучения:

$$x(t) = \sum_m a_m e^{im\omega t} \Rightarrow q_{mn} e^{i\omega_{nm} t}$$

И если раньше для, скажем, квазипериодического излучения мы имели бесконечный ряд Фурье, то Гайзенберг предложил коэффициенты при гармониках заменить на двухиндексные комбинации. Таким образом, система усложнялась. Возникал вопрос – зачем в одномерной системе вводить два индекса? Ответ – комбинационный принцип Ритца, да и формула Бора – в них возникала пара индексов. Сейчас эти коэффициенты q_{mn} мы называем матричными коэффициентами. Матрицы возникают именно здесь.

При этом стоит отметить, что сам Гайзенберг не был знаком с линейной алгеброй и теорией матриц. В июне 1925 года он просто вводит эти наборы. Причем рассмотренная им задача была только одномерной – полноценное решение задачи Кеплера в трехмерном пространстве потребовала бы очень серьезного аппарата. Поэтому Гайзенберг даже и не пробовал решать задачу Кеплера.

Но в итоге, какую же конкретную задачу решил Гайзенберг? Ведь нельзя опубликовать работу по физике, в которой просто высказаны общие принципы и общие идеи. Тем более, какие-то абстрактные наборы.

Гайзенберг рассмотрел ангармонический осциллятор:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x + \lambda x^2 = 0$$

И здесь введение двухиндексных конструкций создавало излишнюю степень свободы – излишний набор коэффициентов, которые вроде как были не нужны. Зато Гайзенбергу удалось внедрить правила квантования сразу на кинематическом уровне. Бор и его последователи занимались этим лишь потом, для отбора конкретных орбит.

Зачем нужно было рассматривать ангармонизм? Дело в том, что, если анализировать уравнение для гармонического осциллятора (даже с позиций идей Гайзенберга и его «метода сумм»), то в результате получится лишь еще один метод вывода решения уже решенной задачи. Специфика задачи Гайзенберга как раз и заключается в том, что он взял ангармонический осциллятор – к уравнению гармонического осциллятора он добавил λx^2 .

Вспоминая теоретическую механику, мы можем сказать, что при добавлении кубической степени от координаты появляется нелинейный сдвиг частоты. А в случае квадрата (если использовать метод приближенного решения Крылова-Боголюбова), частота остается той же, что и в гармоническом осцилляторе, но возникают дополнительные гармоники.

В итоге, Гайзенберг, используя свой метод, получил очень интересный результат. Появляются известные уровни энергии:

$$W = \frac{\hbar \omega_n}{2\pi} \left(n + \frac{1}{2} \right)$$

Этот результат отличался от предшествующих наличием слагаемого $1/2$. Для осцилляторов в работах Планка получались уровни $\hbar \omega_n$. А здесь, так как n считается от нуля, возникает нулевая энергия. То есть, система вообще не может находиться в

состоянии абсолютного покоя. Таким образом, выражение для энергии основного состояния ($E = \hbar\omega/2$) появилось именно здесь.

В сентябре 1925 года Борн и Йордан, коллеги Гейзенберга, которые были хорошо математически подкованы, очень сильно заинтересовались его работами. Они выяснили, что используемые Гейзенбергом громоздкие «правила сумм» есть результат, прямо стыкующийся с теорией матриц, разобранной математиками в середине 19 века. В итоге вышли работы Борна и Йордана, «О квантовой механике I» и «О квантовой механике II».

Степень обобщения в этих работах была уже очень высокой. И речь шла не только об алгебре матриц, но и о введении матрицы энергии H . Вместо классического гамильтониана появляется матрица. И этих работах решалась задача диагонализации этой матрицы:

$$\det\|\hat{H} - \lambda I\| = 0$$

Такая задача хорошо известна из матричной алгебры.

Затем, в конце 1925 года был сделан следующий шаг. Американский теоретик Винер, специалист по теории линейных операторов, показал, что матричные расчеты эквивалентны введению линейных операторов. Более того, удалось вместе рассмотреть инфинитные задачи (с непрерывным спектром) вместе с финитными (с дискретным спектром, чем занимался Гейзенберг). Здесь теория линейных операторов и теория матриц стыкуются.

Здесь интересно то, что в работе Борна и Винера не был сделан последний шаг. Вы понимаете, что при современном изучении квантовой механики, первым делом рассматривают оператор импульса (обычно, в координатном представлении):

$$p = \frac{\hbar}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial q}$$

По причине отсутствия этого оператора, работу Борна и Винера можно считать еще предварительной.

Примерно в это же время в Англии публикуется работа Поля Дирака, который показал, что ключевым моментом здесь является новая, некоммутативная алгебра. Если обычную механику можно рассматривать как вариант воплощения обычной, коммутативной алгебры p, q , то в квантовой механике эта алгебра заменяется некоммутативной алгеброй q чисел, которые соответствуют квантовой системе.

Вы знаете, что всю классическую механику можно построить на основе скобок Пуассона. Таким образом, при замене классических скобок Пуассона на квантовые возникает новая алгебра q чисел.

Сейчас, при обучении студентов, матричные методы используются в несколько фоновом режиме. Конечно, решить задачу ангармонического осциллятора – это хорошо, но вот при рассмотрении атома водорода уже придется решать трехмерную задачу Кеплера. И делать это с помощью методов матричной механики это довольно сложно. Поэтому развитие квантовой механики с июня 1925 года по начало 1926 года происходило при условии, что самую главную задачу, атом водорода, решить тогда не могли. И «старую» квантовую теорию, основанную на постулатах Бора, нечем было заменить.

В начале 1926 года Дирак и Паули, одновременно, решили новым методом задачу атома водорода. Процесс решение оказалось довольно непростым с точки зрения математически. Таким образом, подход матричной механики обладает рядом концептуальных преимуществ, но, тем не менее, сложным математическим аппаратом.

Возникновение волновой механики

Мы с вами говорили, что Эйнштейн, еще в 1908 году, ввел концепцию корпускулярно-волнового дуализма. Тогда, после 1905 года, возникла идея фотона. Но даже из той работы следовало, что такой корпускулярный подход объясняет далеко не все явления. Что касается излучения черного тела, то концепция фотонов приводила к формуле Вина, то есть к высокочастотному пределу формулы Планка. И когда Эйнштейн вернулся к этому вопросу, выяснилось, что в низкочастотной области фотоны себя проявляют в большей степени как волны, а в высокочастотной – как частицы. В результате, у Эйнштейна в 1908 году появляется идея корпускулярно-волнового дуализма для фотонов, для электромагнитного излучения.

Когда мы говорим о механике массивных частиц (электронов), то ситуация развивается похожим образом. Изначально электрон считался частицей, Дж. Дж. Томсон открыл и исследовал его свойства, как частицы. При этом понемногу выясняется, что не все так просто и что нельзя применять классическую механику в лоб.

Далее, когда мы обсуждаем механику Гамильтона, нужно иметь в виду, что сам Гамильтон начинал с оптики. Его динамика рассматривалась как динамика оптических частиц. Еще в начале 19 века Гамильтон вводил оптико-механическую аналогию. Этот момент следует помнить.

Кроме того, обсудим еще один простой, но важный вопрос. Мы сейчас говорим о возникновении волновой механики. И, отвечая на вопрос «как она возникла?», многие вспоминают дифракцию и интерференцию электронов. Но надо иметь в виду, что реальная физика не развивается по каким-либо схемам. Все началось не с опытов по дифракции и интерференции электронов с последующим развитием теории, а наоборот – теоретические идеи о волновой природе электронов навеяли экспериментаторам мысли о дифракции и интерференции электронов.

Волновая идея, прежде всего, возникает из работ Луи де Бройля 1923-1924 годов. Сам де Бройль исходил из сугубо фундаментальных теоретических соображений. Он рассмотрел следующую идею. Да, в задаче Планка излучения черного тела возникают частоты, связанные с частицами. Похожие идеи появляются и в атомной физике. И, исходя из специальной теории относительности (которую к тому времени уже воспринимали очень серьезно), не может иметься просто какая-то частота. В рамках СТО, частота не является инвариантом. Инвариантом является некая четырехмерная комбинация из частот и волнового числа, называемая волновым четырехвектором. Таким образом, при рассмотрении разных систем отсчета, обязательно в какой-нибудь из них, помимо частоты, возникнет пространственная компонента волнового четырехвектора. И его нужно как-то рассматривать.

Здесь де Бройль догадался, что нужно ввести связанные пары. Так как частоте соответствует энергия, то пространственной частоте должна соответствовать своя величина, которая оказывается импульсом. Таким образом, в релятивизме возникает четырехмерная комбинация из энергии и импульса.

Из таких сугубо релятивистских соображений де Бройль вводит идею волн вещества. Таким образом, мы видим, что никакой дифракции и интерференции здесь нет. Скорее, здесь имеют место соображения, следующие из лоренц-инвариантности. Появляются связанные постоянной Планка пары – энергия и частота, импульс и волновой вектор. Покоящаяся частица не обладает импульсом и, соответственно, волновым вектором. При движении, по тому же принципу, возникает связанная с этой частицей волна, имеющая конечную скорость, конечное волновое число и конечную длину волны.

Обратите внимание, что при движении таких частиц, фазовая скорость не имеет никакого отношения к скорости движения самой частицы. Немного перенормировав энергию, мы тем самым можем поменять фазовую скорость волны. Таким образом, смысл этих волн не был сразу понятен.

Но вышеизложенные рассуждения были лишь первым моментом. Второй момент отвечает на вопрос «а для чего все это делается?». Он дает применение этим волнам,

которое оказывается опять завязанным на правилах квантования. Необходимость введения этих волн Луи де Бройль объяснял следующим образом. При рассмотрении того же атома водорода, условие $\oint p_k dq_k = n_k h$ соответствует тому, что на орбите электрона укладывается целое число половинок длины волны. Другими словами, на орбите возникает стоячая волна.

Идея стоячей волны как объяснение правил квантования. То есть, стационарное состояние – это есть некая стоячая волна. И как в обычном, классическом резонаторе, стоячая волна не может обладать произвольной частотой. Нужно наложить условия существования стоячих волн, которые, оказывается, совпадают с правилами квантования.

Далее, только в 1927 году Дэвиссону и Джермеру в США, а Джорджу Паджету Томсону в Англии удалось поставить различные эксперименты. В них были открыты предсказанные Луи де Бройлем интерференция и дифракция электронных волн на поли- и монокристаллов. С точки зрения истории здесь интересен следующий момент. Джордж Паджет Томсон был сыном Дж. Дж. Томсона. Получается, что отец открыл корпускулярные, механические свойства электроном, а сын – волновые свойства. Оба стали нобелевскими лауреатами за эти открытия.

Далее, как вы знаете, в 1926 году Эрвин Шредингер, замечательный австрийский физик, на основании идей, выросших из теории де Бройля, смог записать замечательное уравнение Шредингера. Оно, с точки зрения удобства, стало оптимальным способом решения задач атомной физики. Конечно, удавалось решать лишь простейшие задачи, потому что дальше приходится использовать различные приближенные методы.

Предметный указатель

Август Крениг.....	154
Авогадро.....	137
Адамс.....	75
Ампер.....	102
Анаксагор.....	28
Анаксимандр.....	24
Анаксимен.....	25
Араго.....	101
Аристарх Саморский.....	26
Аристотель.....	16, 22, 30, 50, 88
Архимед.....	37
Бальмер.....	215
Бейс-Баллот.....	155
Бернулли.....	86
Берцелиус.....	137
Био.....	101
Боголюбов.....	170
Больцман.....	9, 19, 117, 127, 160, 168, 170, 195, 208, 220
Бор.....	217, 221
Борелли.....	54
Борн.....	224
Боскович.....	94
Брюстер.....	111
Ватсон.....	83
Вебер.....	19, 104, 123, 127, 175
Вильсон.....	219
Вильям Томсон.....	148, 159, 165, 198, 215
Вин.....	195, 216
Винер.....	224
Власов.....	170
Вольта.....	88
Гадолин.....	90
Гайзенберг.....	222
Галилей.....	8, 10, 11, 17, 42, 89
Галлей.....	56, 63
Гальвани.....	88
Гаусс.....	19, 155
Гей-Люссак.....	137
Гельмгольц.....	19, 128, 145
Герпат.....	154
Герц.....	19, 129, 176, 180, 182, 203, 218
Гиббс.....	168
Гильберт.....	81, 101

Гоуксби.....	82
Грин	114
Гук.....	54, 62
Гюйгенс	8, 11, 52, 63, 107
Дальтон.....	96, 136
Дебай	208
Декарт	11, 17, 47, 48, 62, 92, 123
Демокрит	28
Дж. Дж. Томсон	132, 177, 180, 181, 203, 216, 226
Дж. Паджет Томсон.....	227
Джемс Бредли	107
Джермер	227
Джинс	198
Джозеф Блэк	91
Джоуль.....	144, 147
Дирак	131, 225
Друде	169
Дэвиссон.....	227
Дюлонг	139
Евдокс Книдский.....	22, 29
Евклид	36
Зеeman	177
Зоммерфельд.....	219
Иоганн Ламберт.....	108
Ишивара	219
Йордан	224
Кавендиш	69, 86
Кеплер.....	53
Керр	177
Кирхгоф.....	194
Клавдий Птолемей	23, 37
Клайперон	138, 154
Клаузиус	118, 149, 154, 175
Кляйст.....	83
Кольрауш.....	106, 126
Комптон.....	204
Коперник	10, 38
Коши	113, 177
Крукс	180
Кулон	87
Курльбаум	198
Лагранж	74, 141
Ладенбург.....	203
Лазарь Карно.....	140
Ланге	19, 66
Лаплас.....	72, 75, 110

Лебедев	131
Леверье	75
Левкипп	28
Лейбниц	55, 61
Ленц	147
Ломоносов	92
Лоренц	169, 174, 201, 206, 220
Лошмидт	165
Луи де Бройль	226
Лукреций Карр	28
Луммер	198
Льюис	187
Майер	143
Мак Куллах	113
Максвелл	102, 121, 156, 175, 178
Малюс	111
Мах	18, 76, 168
Менделеев	136
Минковский	188
Михельсон	196
Мушенбрек	83
Навье	112
Нагаока	216
Натансон	206
Никольсон	216
Ньютон	8, 11, 12, 16, 52, 60, 65, 82
Ом	103
Оствальд	168
Отто фон Герике	82
Паскаль	56
Пашен	196
Перрен	169, 180, 215
Пикар	64
Пифагор	25
Планк	138, 168, 187, 195, 196, 199, 207
Платон	21, 29
Пойтинг	131
Принсгейм	198
Пристли	86
Пруст	136
Пти	139
Пуанкаре	12, 75, 132, 167, 183
Пьер Буге	108
Резерфорд	217
Ремёр	107
Ренн	51

Ритц.....	215
Рихман	83, 90
Роберваль	54
Роберт Бойль.....	56, 72, 93, 136
Роуланд.....	129, 174
Рубенс	198
Румфорд	142
Рэлей	198
Савар.....	101
Сади Карно.....	148
Смолуховский.....	169
Снеллиус	49
Стефан	195
Стефан Грей.....	82
Столетов	203
Тихо Браге.....	53
Толмен	187
Торричелли	47, 89
Уоллес.....	51
Уотерстон	154
Фалес Милетский	24
Фарадей	94, 101, 119, 181
Физо	108, 182
Фицджеральд	181
Франк.....	218
Франклин.....	84
Френель	110, 111, 112, 182
Фуко.....	108
Фурье	138
Ханс Эрстед	101
Хевисайд	131, 181
Хемфри Деви	101
Хэмфри Дэви.....	142
Шарль Дюфе	82
Шредингер	227
Штарк	204
Эйлер	11, 74, 86, 109
Эйнштейн	169, 185, 202, 208, 220, 221
Эпикур	28
Эпинус	85
Эренфест	220
Эрнст Сольвэ	206
Юнг	87, 109