



ФИЗИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА



ФОНД

ВОЛЬНОЕ ДЕЛО

teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

ИСТОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ФИЗИКИ

ТРУБАЧЕВ
ОЛЕГ ОЛЕГОВИЧ

ФИЗФАК МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН
СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ
ПРОФ. РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ
СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ.
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ
НА [VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).

ЕСЛИ ВЫ ОБНАРУЖИЛИ
ОШИБКИ ИЛИ ОПЕЧАТКИ,
ТО СООБЩИТЕ ОБ ЭТОМ,
НАПИСАВ СООБЩЕСТВУ
[VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).



БЛАГОДАРИМ ЗА ПОДГОТОВКУ КОНСПЕКТА
СТУДЕНТКУ БИОЛОГИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ
ДУДОРОВУ АНАСТАСИЮ ВАЛЕРЬЕВНУ



Содержание

Лекция 1. Развитие физики по Томасу Куну	6
Развитие физики по Томасу Куну	6
Парадигма в науке	6
Научные революции	8
Истинность физического знания	8
Физика и философия	8
Лекция 2. Периодизация развития физики. Предыстория физики	10
Предыстория физики	10
Античные школы	10
Эпикур	11
Платон	12
Евдокс Книдский	12
Философия Аристотеля	12
Механика Аристотеля	13
Александрийский период (III в. до н. э – II в. н. э.)	14
Архимед	15
Клавдий Птолемей	15
Упадок древней физики (150–700 г. г. н. э.)	15
Средние века (VII–XV века)	16
Лекция 3. Системы устройства мира	17
Система Коперника	17
Система Галилея	17
Эванджелиста Торричелли (1608–1647)	18
Рене Декарт (1596–1650)	19
Христиан Гюйгенс ван Зёйлихем (1629–1695)	20
Возникновение теории гравитационного взаимодействия.	20
Механика континуума (аэостатика и гидростатика)	21
Лекция 4. Развитие механики. Механика Ньютона	22
Системы устройства мира	22
Предварительные физико-математические труды	22
Математические начала натуральной философии	22
Введение	23
Первый том — о движении тел	24
Второй том — влияние среды	25
Третий том — система мира и правила рассуждения в физике	26
Развитие механики в XVIII-XIX веке	26
Лекция 5. Физика XVIII века. Период невесомых	28
Развитие физики электрических и магнитных явлений	28

Развитие теории тепла	30
Исследования по калориметрии	31
Кинетическая теория тепла	31
Идеи хорватского философа Рожера Йозефа Босковича (1759 г.)	32
Причины упадка кинетической теории тепла после середины XVIII века . .	32
Лекция 6. Развитие электродинамики и оптики	34
Постоянные токи. Электродинамика дальнего действия.	34
Электродинамика Гаусса — Вебера	35
Развитие оптики до середины XIX века	35
Идеи Леонара Эйлера о природе цвета	36
Оптика Огюстена Жана Френеля	37
Формирование математической теории упругости	37
Лекция 7. Концепция электромагнитного поля Фарадея — Максвелла	38
Майкл Фарадей (1791–1867 гг.)	38
Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879)	38
Экспериментальное обоснование теории Максвелла	39
Последующее Развитие	40
Лекция 8. Формирование молекулярно-кинетической теории	41
Физика газов	41
Физика тепловых явлений в первой трети XIX века. Формирование идеи сохранения энергии	42
Майер, Гельмгольц, Джоуль	43
Юлиус Роберт фон Майер (1814–1878)	43
Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц (1821–1894)	44
Джеймс Джоуль (1818–1889)	44
Возникновение термодинамики. У. Томпсон и Р. Клаузиус. Необратимость физических явлений	44
Лекция 9. История формирования термодинамики и статистической физики	46
Возникновение молекулярно-кинетической теории в середине XIX века . .	46
Исследования Дж. Максвелла по МКТ в 60-е годы XIX века. Проникнове- ние теории вероятности в физику	46
Людвиг Эдуард Больцман (1844–1906). Создание статистической физики .	48
Релаксация к состоянию равновесия. Согласование с МКТ и вывод второго начала термодинамики	49
Ситуация конца 70-ых–90-ых гг. XIX века, кризисное развитие МКТ . . .	49
Дальнейшее развитие статистической физики	50
Дальнейшее развитие физической кинетики	50

Лекция 10. Возникновение специальной теории относительности	51
Деятельность Гендрика Антона Лоренца (1853-1928 гг). Возникновение	
электронной теории	51
Сфера применения ионной теории Лоренца	51
Электродинамика движущихся тел	52
Открытие электрона (1897)	52
Электродинамика движущихся тел	53
Анри Пуанкаре и электронная теория Лоренца	54
Альберт Эйнштейн (1879-1955 гг.) и возникновение СТО	54
Механика СТО	54
Признание СТО	55
Лекция 11. Возникновение квантовой теории	56
Сложности классической физики на рубеже XIX века	56
М. Планк: первый подход к проблеме	56
Теория фотоэффекта, идея кванта света (фотона)	57
Идея корпускулярно-волнового дуализма света	58
Применение идеи квантов — новая механика	59
Сольвеевский конгресс ноябрь 1911 года	59
Теплоемкость твердого тела	59
Лекция 12. История возникновения квантовой механики	60
Развитие теории строения атома	60
Атомные модели	60
Модель атома Н. Бора (1913)	61
Развитие правил квантования	61
Принцип соответствия	62
Создание матричной механики	62
Возникновение волновой механики	63

Лекция 1. Развитие физики по Томасу Куну

Развитие физики по Томасу Куну

Томас Сэмюэл Кун говорит нам о том, что важно не только рассматривать и оценивать вклад великих ученых, но и смотреть на то, как это воспринималось в рамках того времени, тех концепций, которые существовали. Это очень не просто и в этом курсе мы попытаемся погрузиться в эту деятельность.

Остановимся на тех результатах, о которых говорил Т. Кун. Естественный позитивизм возникает у всех, кто занимается физикой так или иначе. Есть некий физический метод, есть экспериментальный метод, мы пытаемся создать обобщением некоторые выводы. Нам и говорят, что все оно так и сформировалось с помощью индукции. На самом деле, это не совсем так.

Развитие физики не было таким линейным и кумулятивным, как говорил Т. Кун. Физика как наука имеет корни в западной древнегреческой античности, и, в тоже время, мы знаем, что физика, как современная наука возникла совсем недавно. Её появление связывается с деятельностью Галилео Галилея. То есть, около 400 лет назад. До Т. Куна были и другие научные революции. Возникновение волновой оптики, события рубежа XIX–XX века — возникновение теории относительности, квантовой теории.

Т. Кун говорит, что для физики характерен неравномерный стиль развития. Его название работы говорит как раз об этом: «Структура научных революций». Научные революции — это естественный процесс. Сначала идет некий линейный процесс, медленное накопление знаний и фактов, потом происходит слом устоявшейся парадигмы, который называется научной революцией, и потом дальше снова накопление фактов и знаний. Т. Кун сам был физиком, поэтому все примеры приводил из физики. Есть термин — «нормальная наука». Это как раз развитие по медленному пути. Тут же возникает слово парадигма, т. е. некий шаблон.

Но Т. Кун расширил это понятие. Есть ранний период развития науки — допарадигмальный. Нет нормальной науки, нет общего согласия о том, как излагать основы науки. Отличается тем, что люди публикуют не статьи, а монографии. Начиная от основ, заканчивая примерами. Например, в механике это XVII век. Как примеры ученых, которые писали в то время: Г. Галилей, труды Рене Декарта. Они как раз писали такие монографии. Не было общеустоявшихся систем. В чем заслуга Исаака Ньютона? В том, что он как раз создал парадигму.

Парадигма в науке

Теория в физике должна быть чем-то похожа на геометрию Евклида. Не любая математическая теория хороша. Геометрия Евклида — это компактный набор первых принципов, откуда можно развернуть массу теорем и задач. В парадигму Т. Кун включает научные сообщества: семинары, институты, журналы. Когда формируется парадигма — это и есть нормальная наука. Народ публикует научные статьи. Чем отличается статья от монографии? Вы чуть-чуть добавляете своего, новизну, но не

обязательно начинать от основ, достаточно сделать ссылку на тех, кто писал об этом. Об этом и писал Т. Кун, что есть устоявшиеся система принципов, методов получения нового, методов обсуждения и методы оценки истинности знания.

Возвращаясь к примерам, механика Ньютона как раз оказалась такой сформировавшейся системой — это была первая парадигма в физике. Она была достигнута в 1687 году. Но при этом хочется дополнить Т. Куна. В этой работе была очень существенная роль математики. И. Ньютон создал ту математику, которая является основой механики. И. Ньютон в своих трудах размышлял в первую очередь геометрически. Однако, мы знаем, что сейчас все рассуждают в основном аналитически. Нужно написать дифференциальное уравнение, решить его. Но это стало актуально только через 100 лет при Леонарде Эйлере.

Второй момент, нам важна не просто математика, а математика на множестве решённых задач. И. Ньютон решил, по-сути, только одну задачу, задачу Кеплера. И. Ньютон решил её индуктивно. Для той эпохи это было гигантским достижением. И. Ньютон сразу увидел, что задача требует дополнения. У Луны же не совсем эллипс получается. Возникает подход к уточнению, взаимодействию нескольких сил. Потом этот метод стали разворачивать. Называется он теория возмущений (на нём позже во многом возникла атомная физика). Когда мы смотрим за космическими телами, мы должны обращать на взаимные влияния. Возникают открытия «на кончике пера» (открытие Плутона). Всего на всего одна задача, а дальше теория возмущений. Очень далеко прокручивать было сложно. На основе этого возникла концепция, которая оказывала большое влияние и продолжает оказывать на широкое научное сообщество — лапласовский детерминизм.

Ситуация начала меняться в XX веке, при Жюле Анри Пуанкаре. В случае общего положения обязательно возникают особые точки, которые приводят к динамическому хаосу. Некая неопределённость в классических динамических системах оказывается выше, чем в квантовых. Было доказано, что есть особые точки, где не работает задача Коши. Сейчас методологические выводы на основе только классической механики нам стоит делать только с большой оглядкой на новые изменения.

Взаимодействие физики с математикой очень своеобразное. Не любая математическая теория пригодна, чтобы о ней говорить, как об основе парадигмы. Есть такие вещи как математическое моделирование. Нужно понимать, что возникают разные ситуации. Одно дело, когда удастся свести задачу к первым принципам. Когда вы проверяете экспериментально и видите, что ваши первые признаки работают. Другое дело, когда вы имеете количественный эксперимент и вы формируете такую математическую модель, которая не сводится к первым принципам, а модель просто позволяет аппроксимировать некую ситуацию. Например, с магнитным полем в ближнем космосе. Есть модели, которые позволяют аппроксимировать и описать это магнитное поле. Такой статус имела и модель Птолемея. И вот с переходом от модели Птолемея к модели Коперника связано возникновение нового раздела в науке — экспериментального естествознания.

Научные революции

Вернемся к Т. Куну. Система не может генерировать новые фундаментальные законы. Она расширяет уже существующие. Т. Кун говорит, что возникает ситуация, когда в существующую парадигму новые данные уже не вписываются, т. е. парадигма их не может переварить. Здесь возникают дискретные переходы от одной парадигмы к другой — скачок — это Т. Кун и называет научной революцией. Он подчеркивает, что это стандартная ситуация для развития науки. Почему именно скачок? Потому что новая парадигма никогда не чуть-чуть дополненной старой. Например, специальная теория относительности (СТО). Была ньютоновская механика, стала СТО. Тут виден как раз скачок, что одно не выходит из другого просто гомоморфизмом. Поэтому переход получается дискретным. Вообще в механике Ньютона и релятивистской механике разная постановка задач. Когда мы говорим о СТО, мы говорим о совсем квантовых системах. Единственное похожее применение — квантовая электродинамика. Но ньютоновской системой мы не можем корректно описать электромагнитное поле. Нет простого линейного замещения одной теорией другой.

Истинность физического знания

Если следовать Т. Куну, то все эти парадигмы оказываются в какой-то степени относительными. С одной стороны это хорошо, потому что мы начинаем с уважением относиться к другим теориям. Например, к теории теплорода. Начинаем относиться как к некому этапу развития, а не как к тупиковому знанию. С другой стороны возникает теоретический релятивизм. Главная проблема в том, что, по-сути, никак всё не удастся свести к одной теории. В физике присутствует всегда несколько разделов. Хочется создать единую теорию всего, но пока не выходит.

Физика и философия

Когда мы говорим о внутреннем развитии физики мы вспоминаем Т. Куна, а когда говорим о внешнем влиянии, важная тема — физика и философия. Физика возникает в западной античности. Здесь наука присутствует в разных положениях. В основном это натурфилософия. Единая наука древности, которая пыталась аргументированно объяснить внешний мир. Но тут оказываются и вопросы философии, и элементы научного знания. Античная натурфилософия — интегральные знания. Главное достижение — система Аристотеля — структура науки, которая возникнет потом. В идейном смысле именно из его концепций возникает та физика, которую мы сейчас имеем. Но при этом, как таковой, настоящей физики тогда не было. Но много положений, которые относятся к физическому знанию.

Дальше деятельность Г. Галилея. Физика в современном понимании. Возникает деление на отдельные области знания — физика и философия. Сам Г. Галилей философией почти не занимался. Де факто возникает экспериментальная физика. Тогда возникает и проблема — есть те, кто непосредственно занимался физикой

(Роберт Бойль, И. Ньютон), а есть люди, которые были больше склоны к философии. Здесь возникает оценка физики со стороны философии. В XVII веке возникает идея индуктивных наук, обращение к эксперименту, к опыту — это и есть новая наука. Внешние влияния от людей, которые оценивали метод новой науки, что есть вещи до опыта (метафизика), что многое определяется мировоззрением исследователя и пр. К этому подходу относился Р. Декарт. Его последователи — картезианцы. Возникает борьба двух взглядов.

Это меняется в XIX веке. Значимость естественнонаучных исследований сильно возрастает. Философы остаются и пытаются делать общую концепцию мира, но становится очевидно, что это неэффективно. Эпоха утверждения позитивистского подхода (Эрнст Мах). Физика сама себе философия, не нужны дополнительные конструкции. Роль философии — критический анализ конкретных исследований с целью выявления метафизики, которая не следует из опыта и эксперимента. Роль философии — оптимизация метода.

Последствия. Наиболее яркое направление — это учение Э. Маха. С точки зрения развития механики получилось много положительного. Например, с точки зрения систем отсчета. У И. Ньютона ничего такого нет. Ланге придумал класс инерциальных систем отсчета. Пример философского влияния на физику. Не должно быть внутренних противоречий в теории. На этой основе выяснилось, что нехороша теория электромагнетизма Гаусса — Вебера. Были силы, зависящие от ускорения. Это был главный аргумент, что теория не годится. Есть и негативные примеры. Взаимодействие Э. Маха и Людвигу Эдуарда Больцмана. Молекулярно-кинетическая теория была создана очень давно. Много что было получено. Но конкретных результатов было получено очень мало. Были внутренние противоречия. При этом она основывается на атомах и молекулах, которые никто в то время в глаза не видел. Поэтому Э. Мах подвергал резкой критике работы Л. Больцмана. В итоге он покончил жизнь самоубийством, причем в тот год, когда физическое (химики в атомы верили с 1808 года) подтверждение теории всё-таки появилось (Жан Батист Перрен, Альберт Эйнштейн и броуновское движение). Трагическое событие, хотя, казалось бы, на основе правильной проверки методологии.

Лекция 2. Периодизация развития физики. Предыстория физики

Предыстория физики

Какая современная периодизация физики и рассказ о её первом периоде. Почему предыстория? Потому что некоторые моменты будем рассматривать без доказательств, а традиционно.

Считается что физика, как наука, в современном смысле началась с деятельности Г. Галилея. Пик его научной деятельности приходится на 1600 год. Всё предшествовавшее этому называется предысторией. В основном это западная античность и греческая натурфилософия. Считается предтечей физики и современного естествознания. Древнегреческая наука была единой, без деления на отрасли. Мы будем говорить кратко о тех моментах, которые наиболее существенны.

Чем отличалась наука древнего мира от знаний других культур? Речь шла об аргументированных знаниях. Если рассматривать другие культуры, то там были глубокие представления о закономерностях окружающего мира, но эти представления основывались на мистике, откровениях и не могли служить предтечей физики. А философия западного античного мира была другой.

Античные школы

Ионийская школа (VII в. до н. э.) традиционно считается первой общеизвестной натурфилософской школой. Основная идея: единства окружающего мира. Основатель — Фалес Милетский (640–550 до н. э.) — легендарная личность, трудов не дошло, но косвенные упоминания остались. Считал основой всех вещей воду. Идеи материального единства, что некая материя может изменяться и создавать различные объекты. Анаксимандр, ученик Фалеса больше исходил из абстракций, вводил первовещество «апейрон». Анаксимен Милетский, ученик Анаксимандра, выводил всё из воздуха.

Вторая школа, которую надо упомянуть, — *пифагорейцы*. Многие идеи, которые были ими высказаны, нашли отражение в последующих открытиях. Основателем школы был Пифагор Самосский (582–500 г. г. до н. э.). Придумал свою, совершенно уникальную систему. Пифагорейцы существовали и позже, после смерти Пифагора. Многие их взгляды представляют интерес и для нас сейчас, очень многие отдельные идеи и закономерности возникли именно тогда, позже на них ссылались, и необходимо знать, откуда эти идеи пришли.

В частности, мы понимаем, что современная физика основана на численных математических закономерностях, и у пифагорейцев основная идея была: едина основа всего — число. В том смысле, что все закономерности управляются числами и числовыми закономерностями. Например, были популярны струнные инструменты. Были приятные сочетания и неприятные. Пифагорейцы первыми заметили, что здесь идет речь о простых кратных отношениях длин струн (3:5 и т. д.).

Вторая замечательная идея: как устроен ближний космос, планеты, звезды? Во-первых, идея, что Земля есть шар. В отличие от последующих учёных, они ставили Землю на одну позицию с другими планетами. Была высказана мысль, что Земля — такая же планета, как и остальные. Пифагорейцы считали, что замечательное число 10. И они считали, что планет должно быть 10. Хотя на тот момент были известны только те планеты, которые можно увидеть невооружённым глазом. Ещё один момент, пифагорейцы считали, что планеты движутся по хрустальным сферическим поверхностям и издают гармонические звуки. Но на тот момент 10 планет было слишком много. Они считали, что есть центральный огонь (не Солнце в центре), а все остальное движется вокруг этого центрального огня. Предположили, что есть еще противо-Земля. Так они попытались добыть необходимые 10 объектов.

Дальше натурфилософия стала развиваться как философия, как взгляд на природу. Древняя античная наука была аргументированна. Что это значит? Сейчас мы под этим подразумеваем ту систему, которая свойственна в основном естественным наукам и математике, что есть компактный набор аксиом, из которых мы потом всё выводим, пользуясь законами логики. Но всё это возникло не сразу. Идеи доказательных рассуждений развивалась постепенно.

Парменид (представитель *Элейской школы*) существенным моментом своего учения рассматривал единство бытия. Поэтому идея развития ему была противна. Как что-то может развиваться, когда всё сущее уже есть? Ещё известным моментом были апории Зенона. Часть из них была связана с тем, что сейчас мы относим к физике. Они показывают некоторую противоречивость внутри понятий, которыми мы пользуемся.

Плюралисты считали, что есть некоторый набор начал, которые нас окружают, что нет возникновения и уничтожения. Возникает идея четырех стихий. Позже стали активно вводить и упоминать пятый элемент. Но когда древние рассуждали о происхождении и строении веществ, то возникали многие философские вопросы. Например, идея делимости. Анаксагору принадлежит идея о мельчайших частицах вещества. Это не атомы, это частицы, которые обладают свойствами общего тела.

Атомисты. Присутствуют начиная с 5 века. Первые атомисты — Левкипп и Демокрит Абдерский, люди легендарные, их трудов до нас не дошло. Но их сильно критиковал Аристотель, а его труды дошли до нас в полном виде, поэтому мы можем черпать идеи атомистов в его трудах. Демокриту было важно, что есть неделимые атомы и пустота. Тут сразу небытие и бытие. Плюс возможность этих атомов слипаться друг с другом, движение, развитие. Регулярность или самопроизвольность движения этих атомов? Лукреций Кар (это уже поздние атомисты, I в. н. э.), написал труд «О природе вещей», там как раз изложены взгляды.

Эпикур

Ещё дошли труды Эпикура. У Эпикура было самопроизвольное движение атомов, но тут нужно быть внимательнее. Что значит регулярность движения атомов? В рамках современных представлений, когда мы говорим о интегрированных задачах, о существовании интеграла движения, здесь всё ясно. Но и то, мы видим

в современной механике, нет места однозначному детерминизму, есть динамический хаос. Описание движения сложная штука. Тогда никакой механики не было, и поэтому всё это было разговорное и в рамках сознания каждого философа, термины «регулярность» и «хаотичность» приобретали свои черты и не имеют отношения к современным представлениям физики. В литературе по квантовой теории присутствуют ещё некоторые высказывания. Идею о том, что атом есть некоторая математическая структура, Вернер Карл Гейзенберг связывал с идеями Платона.

Платон

Геометрический атомизм Платона. Платон жил уже в ту эпоху, когда философия стала уже похожа на современную философию. Но Платон больше интересовался знаниями, которые далеки от современной физики. Параллельно развивалась и математика. Теория чисел формируется где-то в XVIII веке. А вот геометрия стала постепенно упорядочиваться ещё в античности. Тогда возникла та самая теорема, которую хорошо многие знают из школьной программы. Существуют всего 5 правильных выпуклых многогранников. Эта теорема была доказана, и возникла идея о 5 стихиях. Платон связал стихии с определёнными многогранниками. При этом эти многогранники были неделимы и возник такой математический атомизм.

Евдокс Книдский

Количественные вещи стали проникать и в астрономию. Ученик Платона, Евдокс Книдский (408–355 г. до н. э.) пытался объяснить движение планет, которые движутся по закономерным траекториям. Предложил систему гомоцентрических сфер. Это направление начинает активно развиваться, но при этом самой популярной идеей была идея Аристотеля о том, что в центре находится Земля, далее есть 10 сфер неподвижных звезд, которые движутся вокруг, а потом идут гомоцентрические сферы других планет.

Философия Аристотеля

Аристотель (384–322 до н. э.) основал Перипатетическую школу. Важная и многогранная роль. На Аристотеле завершается первый период предыстории физики, формирование древнегреческой натурфилософии. Труды Аристотеля в значительной степени дошли до нас. Аристотель был гигантским авторитетом. Поэтому период после его жизни проходил под знаком его учения. Г. Галилей, например, в значительной степени отталкивался от его учений. Поэтому, необходимо изучить его основные положения. Наиболее ценно то, что он довел до определённой степени совершенствования то, как должна выглядеть наука. Он дал то, что во многом определило дальнейший вид современной естественной науки. Здесь с одной стороны есть вещи во многом спорные, потому что это была ранняя степень исследования окружающего мира. Поэтому то, что сейчас называют физикой Аристотеля вызывает

вопросы. Но мы должны это учитывать, потому что это сказывалось на дальнейшем развитии науки.

Первое, идея о том, что должна быть четкая логическая конструкция, т. е. законы логики, которые можно найти, они были сформулированы именно Аристотелем. Второе, что есть некоторый образец, что должен быть компактный набор первых принципов (аксиомы, законы). Этот набор должен обладать определёнными признаками: внутренней непротиворечивостью, определённой полнотой. Но этот набор довольно компактный. Те принципов должно быть мало. А дальше из них на основании логики должны выводиться конкретные задачи. Геометрия Эвклида и была таким продолжением идей Аристотеля. Если говорить о физике, то, конечно, тогда не удалось так последовательно сформулировать теорию. Но эта логическая чёткость была на высоком уровне. Ещё везде пишут про то, что сформулировал идею причинности, но это скорее относится к идее одушевления природы, потому что причинность скорее про человека и его намерения. Принцип причинности есть и в современной физике, но он несколько другой.

Был сформулирован термин физика. Кроме того, Аристотель пытался не только сформулировать общие положения, но и нарастить на них «мяса». Деятельность Аристотеля — обобщение идей натурфилософов. Но тут обобщение было не совсем удачно, но надо знать, потому что последующие эпохи во многом отталкивались именно от его трудов и положений.

Принципы. Решительно критикует атомистов и считает, что не существует пустоты. Пытался логически доказать это. У каждого тела есть свое место и тело движется к нему. В пустом пространстве движение невозможно. Представление о 4 началах-стихиях, и ещё добавлял эфир. Считал, что комбинации из 4 противоположных начал (тепло–холод, сухое–влажное) дают нам элементы. Говорил о том, что тела имеют позицию относительно некой абсолютной системы. Что есть некоторый центр всего и все тела имеют определённое положение относительно этого центра. Эфир — пятый элемент, самый легкий и находится дальше всего от земли. Делил мир на подлунный и надлунный. Подлунный мир — одни закономерности, в надлунном мире — космическом — действуют другие, идеальные, законы, и вообще всё идеально. Всё движется по гармоническим сферам. Чем ближе к Земле, тем более несовершенно движение. А Земля — истинно неподвижное тело.

Механика Аристотеля

Аристотель попытался создать свою механику. Это был вариант именно механики, потому что пытался объяснять движение и его описать. Он понял, что есть некоторая относительность движения. Аристотель считал, что тела не могут производить влияния на окружающее, поэтому идея атмосферного давления была противоположна его идеям. В XVII веке при возникновении новой науки, когда при отталкивании от идей Аристотеля, с одной стороны, брали его идеи: механику тел и точки, а с другой стороны, возникла идея атмосферного давления, которая была противоположна идеям Аристотеля. Другой его идеей была идея «разрежения». Это было известно и во времена Аристотеля. Но тогда это объяснялось совсем

иначе. Сейчас мы объясним это с помощью атмосферного давления. Аристотель же объяснял, что внутри возникает попытка создания пустоты, и эта область пытается избавиться от пустоты, «страх пустоты».

Движения были разных типов:

- идеальные движения — движение небесных тел в надлунном мире;
- естественные движения — движения к «своему месту», сверху вниз;
- насильственные движения — есть некий активный субъект, который воздействует на тело его двигает.

Иногда говорят о механике Аристотеля в современном, примитивном виде. Что есть механика Ньютона, а есть механика Аристотеля. Но стоит иметь в виду, что сам Аристотель формул почти не писал. Он не делал однозначных выводов о движении. Г. Галилей смог описать движение у поверхности. Его описание не противоречит Аристотелю, но сами идеи и утверждения противоречат. Так что физика Аристотеля с формулами довольно сомнительная вещь. Есть целый ряд законов, которые были получены до Аристотеля: закон рычага, законы геометрической оптики, они не имеют конкретных авторов.

Существенно, что внутри механики Аристотеля были намёки на внутренние противоречия. Например, при бросании предмета. Предмет сначала летит вверх, а потом уже вниз. Но если мы привлекаем идею насильственного движения, то предмет должен двигаться вверх, только пока находится в контакте с рукой бросающего, но он летит вверх и после разрыва контакта. Аристотель пытался объяснить это очень сложными вещами. Так он говорил, что когда предмет летит вперед, он расталкивает воздух, позади предмета возникает «страх пустоты» и воздух спереди предмета перемещается назад, стараясь заполнить эту пустоту и таким образом подталкивает тело вперед. Это получило название антиперестасис. В теории, наука не должна быть внутренне противоречива. Получается, что существенная роль воздуха и в движении вниз, он говорит, что если воздух плотнеет, то предмет падает медленнее, а тут получается, что воздух убегает и сам подталкивает.

Еще важный момент, с которым надо быть осторожным. Можно услышать, что в механике Аристотеля сила пропорциональна весу тела умноженному на скорость. Здесь содержится сразу несколько логических ошибок. Для начала Аристотель никаких таких формул не писал, вообще античности не свойственно понятие скорости, раньше не делили величины имеющие, разные размерности. Так мы сформулировали роль Аристотеля.

Александрийский период (III в. до н. э – II в. н. э.)

Центр мира преобразуется — создается империя Александра Македонского. Центр западной науки перемещается в Александрию и долгое время там прибывает. Этот период иногда называют периодом математической физики. Оно противоречит современной терминологии, но отражает ту эпоху. Математика сформировалась как система определенных теорий и ищет себе применение, возникают более точные математические структуры. Роль математики существенно повышается, но это не

современное значение термина. Если до этого математика была не систематизированными знаниями, то у Евклида возникает структура, компактные наборы первых принципов. Здесь возникают попытки дальнейших распространений и применения. Евклид пишет про геометрическую оптику, оптика, картоптика. Тогда не было закона о преломлении, но даже из закона прямолинейного распространения можно было многое получить.

Архимед

Дальше деятельность Архимеда. Здесь речь шла о выводах из закона рычага и основание статики и гидростатики с применением новой математики. У Архимеда при расчёте удельных весов мы видим зачатки того, что потом назовут бесконечно малыми. На Архимеда ссылаются учёные Нового времени, тут постепенного развития не получилось.

Клавдий Птолемей

Другая персона этого периода — Клавдий Птолемей, александрийский ученый (II в. н. э.). Его деятельность состоит из нескольких направлений, но основным трудом можно считать «Альмагест» (звездный каталог). Тогда не было оптических приборов, но были средства измерить позиции, можно было фиксировать координаты звёзд. В какой-то степени основываясь на идеях Аристотеля он поместил Землю в центр, но потом ввел эксцентрики, чтобы точнее описать движение планет. К. Птолемей отталкивался от идеи сочетать эпициклы и дифференты. Система мира — это система, которая позволяла рассчитать расположение всех тел, планет, в любой момент времени. Но не было никакой идеи, почему выводилась такая сложная система. Система мира Птолемея была очень точной, точнее идей Николая Коперника. Так что это был не основной аргумент перехода на иную систему мира в Новое время.

К. Птолемей пытался исследовать геометрическую оптику. Он пытался применить и экспериментальный метод. Количественные эксперименты были затруднены, потому что был минимум информации. Хороший пример оптика — была попытка создать закон преломления. Есть и эксперимент — измеряли углы транспортом. Идея была доказать, что угол преломления пропорционален углу отражения. Сейчас бы сказали, что это справедливо при малых углах. Но не верно в масштабе. Были описания экспериментов, не было отторжения относительно экспериментального изучения каких-либо закономерностей.

Упадок древней физики (150–700 г. г. н. э.)

Начиная со II века, до конца VI века имеют место определённые уклады, угасает интерес к науке, появление новых религиозных течений. Александрийская библиотека и учёные вокруг неё были уничтожены в результате арабского завоевания. Сменилась ментальность людей. Вопросы души и ментальности стали интересовать людей больше.

Средние века (VII–XV века)

О средневековой науке много что написано, но это только детали. Что касается сохранения античных трудов — очень большая часть трудов была уничтожена и пропала. Арабы большую часть трудов сохранили и перевели. Именно в эту эпоху уменьшается интерес к общим закономерностям, но повышается догматический интерес к Аристотелю. Конкретные положения превращаются в догмы, и, когда интерес восстанавливается, оказывается что в центре всех учений представления Аристотеля. И вся средневековая наука — учение Аристотеля о центре мира. Считается традиционным у всех представителей истории науки. Перелом происходит буквально на рубеже XVI/XVII веков и связан с Г. Галилеем. Деятельность он осуществляет практически, но потом, ретроспективно мы можем говорить, что это тот самый момент возникновения физики.

Научная революция XVI-XVII (первая треть). Возникновение экспериментального естествознания.

Лекция 3. Системы устройства мира

Система Коперника

Система мира Птолемея показала высокую точность. За 13 веков её использования ошибка накопилась небольшая. Н. Коперник сам свою систему (с круговыми орбитами) проверить не мог. И чтобы добавить точность ему пришлось ввести эпициклы. Даже при создании гелиоцентрической системы приходилось учитывать неравномерность движения. Сейчас нам известно, что там речь идет о законах Кеплера. Но Н. Копернику пришлось пользоваться приемами древних. Потом, чтобы проверить качество системы пришлось достаточно долго наблюдать, потому что измерить накапливающуюся ошибку было довольно сложно в то время.

И, где-то чрез 50 лет после смерти Н. Коперника, стало понятно, что модель не очень точная. Однако, вектор развития был очень важен. Вектор идейного упрощения. То, что получилось в итоге, получилось только после И. Ньютона, в математическом отношении было сложнее, чем у К. Птолемея, но компактный набор первых принципов, идейная простота и четкость логических выводов составляла суть упрощения и направление развития новой науки. Обеспечило идеологический успех. Систему мира Коперника сначала никто не запрещал. Серьезно история стала развиваться только в начале XVII века.

Система Галилея

Отцом основателем современной физики считается Г. Галилей (1564–1642 гг.).

Был вдохновлен мыслью Н. Коперника. Идея о том, что тяжесть, которую мы ощущаем, притяжение, должно присутствовать в схеме мироустройства. Есть покушение на ряд идей Аристотеля. Помещение Земли на край мира. Но, когда мы говорим о конкретной деятельности Г. Галилея, то она распадается на две сферы: астрономия и механика.

Астрономические исследования с использованием «телескопа». Это не был «настоящий» телескоп, это была скорее подзорная труба. Г. Галилей сделал скорее качественные открытия, а это не дает новой науки. Он открыл пятна на Солнце, открыл его вращение, горы на Луне, фазы Венеры и многое, что подтверждало идеи Н. Коперника и сходство планет с Землей. Открытие «медицинских лун» — с помощью трубы можно наблюдать 4 самых крупных спутника Юпитера (ныне называемых галилеевыми лунами). Г. Галилей наблюдал их движения, такую Солнечную систему в миниатюре. В 30-е годы XVII века начались неприятности с инквизицией. С какого-то момента было запрещено пользоваться системой мира Коперника, поэтому те, кто не хотел иметь проблемы с властью, они прикрывались объяснением движением системы этих медицинских лун. Но это всё качественные элементы.

Второй момент — это создание новой последовательной науки, науки «о местном движении». Тогда механику делили на две части. Сам Г. Галилей выделял науку о движении небесных тел и науку о местном движении. Первую Г. Галилей не

очень и рассматривал. При создании новой науки — науки о местном движении, то есть о движении тел у поверхности Земли — он рассматривал это под воздействием тяготения. Это был первый реальный этап создания новой физики. Г. Галилей не говорит о методе новой науки. Это не философские труды, а реальное применение метода. Во-первых, он формулировал основные принципы. Многие принципы он формулировал до экспериментальных исследований. Существенную роль играли и количественные эксперименты, и математика. Это были физические исследования в их современном варианте. Во времена Г. Галилея не было точных механических часов, поэтому вместо кидания предметов вертикально вниз он изучал качение шаров по наклонной поверхности. Интересно, что Г. Галилей фактически решал неправильную задачу, сейчас любой первокурсник скажет, что если катить шар по желобу, то трение, конечно, маленькое, но при этом ускорение будет дополнено вкладом вращательного движения и момента инерции шара.

Принципы новой механики:

- Математически точное описание
- Законы равноускоренного движения (в остаток мат анализа)
- Идеи мгновенной скорости и «вектор» – направленный отрезок
- Принцип разложения движений
- Принцип инерции как предел (нет прямой формулировки)
- Принцип относительности
- Принцип Торричелли

Г. Галилей предложил такой вариант разложения движения: качение — замедленное падение, одновременно и падение, и движение в сторону. Но при этом при изменении угла, при стремлении угла к 90 ускорение не будет совпадать с ускорением свободного падения. Это была эпоха, когда не было математического анализа. Современникам не была понятна мгновенная скорость. В отличие от античности понятие скорости уже вводилось, но не очень было понятно, как ввести понятие скорости в определённый момент времени. Г. Галилей сформулировал ту систему взглядов, которую преподают школьникам сейчас. Тогда были другие принципы механики, мы не со всеми можем согласиться. Например, разложение движения. Принцип инерции. Явной формулировки нет, но качественно он об этом говорит. Принцип относительности. Нет формулировки. Там есть качественное обсуждение наблюдений в адмиральской каюте корабля. При отсутствии качки невозможно понять, движется ли корабль или нет. Есть ещё принцип Торричелли, он был учеником. Это предтеча закона сохранения энергии. Что скорость пропорциональна квадрату высоты. В чем заключалось принципиальное отличие от натурфилософии? Ускорение не зависит от массы тела и принцип инерции.

Эванджелиста Торричелли (1608–1647)

Очень много к работам Г. Галилея добавил его ученик Эванджелиста Торричелли. Более детальные исследования с телами, брошенными под углом к горизонту. Тут уже математическое исследование. Первая попытка хозяйственных задач. Математические исследования полёта снарядов. У Г. Галилея были утверждения о том,

что есть свойства колебаний маятника. обратил внимание на изохронность маятника. Эта изохронность и период колебания, этот результат принадлежит Э. Торричелли. Формулу для колебания маятника вывел.

Рене Декарт (1596–1650)

Центральная фигура после Г. Галилея. Не только он, но его положения сыграли существенную роль в развитии физики вплоть до XIX века. Картезианцы — последователи Р. Декарта. Сам Р. Декарт — уникальная личность, он сочетал в себе и философскую работу, и математическую, разработал аналитические методы геометрии. В физике тоже совершил несколько открытий: открытие преломления света. В эти годы геометрическая оптика оформилась как самостоятельная наука. Тогда была тенденция оценки науки со стороны. Это была индуктивная экспериментальная наука. У Р. Декарта была особая позиция, нестандартная, относительно того, что тогда было популярно. Часто можно услышать «метафизика Декарта». Он много внимания отдавал тем принципам, которые формулируются ещё до эксперимента.

Второй момент, идеи сплошной среды. Новая наука отталкивалась от Аристотеля, его положения объявлялись устаревшими, но при этом Р. Декарт в эту тенденцию не укладывался. Возвращается атомизм. А Р. Декарт, вслед за Аристотелем, говорил, что весь мир чем-то заполнен и нет пустоты. Это положение утверждается на новом уровне. Механика сплошной среды стыкуется с механикой твердого тела, но является самостоятельной наукой. Р. Декарт ввел понятие континуума, непрерывной сплошной среды. Главная задача заключается в исследовании некоторой структуры. Вихри Декарта используются для описания взаимодействий некой среды. Структура этой среды была очень сложной.

Р. Декарт не был атомистом, у него среда была везде. Однако он вводил понятие корпускулы (корпускула Декарта). Столкновение корпускул. Он сам поставил задачу о соударении двух тел. При этом, корпускулы совсем не атомы. Идеи близкодействия. Противостояние дальнего действия и близкодействия возникает именно тогда. Р. Декарт был именно за близкодействие. Что такое близкодействие? Это то, что все взаимодействия надо объяснять через взаимодействие тел, помещённых в одну точку. Тела взаимодействуют только при непосредственном контакте. А если этого не наблюдается, то надо искать посредников. При попытке объяснить движение небесных сфер, предполагали наличие некоторых «флюидов», которые взаимодействуют с телами.

Принцип инерции. Помимо формулировки принципа инерции, только после Р. Декарта механика становится наукой. Слово «взаимодействие» возникает только после Р. Декарта. Наиболее ярким приложением этой идеи стала идея создать законы соударения корпускул. С одной стороны, был позитивный момент в том, что есть некая мера движения, что есть количество движения — импульс — но у него было неудачное описание. Его современники не очень восприняли эти законы, но была поставлена задача и решение этой задачи серьёзно продвинуло науку.

Одним из первых конкурсов Лондонского королевского общества был конкурс по решению задачи о взаимном соударении тел. Было предложено три варианта

решения: Джон Валлис (математик) рассмотрел абсолютно неупругий удар, Кристофер Рен (архитектор) и физик Христиан Гюйгенс ван Зёйлихем рассмотрели абсолютно упругий удар. Задача о касательном ударе была абсолютно невозможна без ньютоновской механики. Речь шла только о лобовом соударении. Самой интересной работа была у Х. Гюйгенса. Это был очень существенным моментом, сам И. Ньютон писал, что третий закон во многом возник как реакция на работы Х. Гюйгенса. Х. Гюйгенс догадался применить принцип Торричелли.

Христиан Гюйгенс ван Зёйлихем (1629–1695)

Это уже в чистом виде математическое продолжение тех задач, которые поставил Г. Галилей. С помощью детальных математических методов Х. Гюйгенс смог решить целый ряд задач, связанных с маятником. Задачу маятника, период колебания маятника, рассмотрел колебания твердых тел, то, что мы называем физическим маятником. Плюс он понял, что это не совсем изохронные колебания, то, что мы сейчас называем нелинейным маятником. Из всей этой нелинейности он разобрал только случай циклоиды, когда колебания станут строго линейными и изохронными. Он одним из первых смог воплотить свои результаты в изобретениях. По-сути, он изобрел маятниковые часы, в том числе и компактные. Во время этих математических опытов он понял, что воплощать циклоиду очень сложно. Следующий момент, в 1673 году вышел труд про маятниковые часы, но там написано не только о часах, там был важный результат. Центростремительное ускорение при движении по окружности. Это не удавалось его коллегам. Это важно по той причине, что к тому моменту многие убедились в актуальности законов Кеплера.

Возникновение теории гравитационного взаимодействия.

Уже в XVII веке важным этапом развития науки была система мира Кеплера. Иоганн Кеплер в какой-то момент отказался от геоцентричности системы Птолемея. На периоде наблюдений 1609–1619 гг., если предположить, что Солнце, а не Земля, находится в центре мира, то точность предсказания положения планет повышается очень сильно. Были сформулированы три закона Кеплера. Речь шла прежде всего о движении планет. Их орбиты близки к окружностям, и постановка Солнца в центр и обозначение движение именно через эллипсы позволили повысить точность вычисленных эфемерид планет в системе Коперника.

У него есть идея всеобщего тяготения, он считал что тяготение распространяется в плоскости эклиптики, что это влияние полумистического типа. Тяготение, как любовь тел. Тут возникают дополнительные идеи. В 40 годы XVII века было опасно публиковать подтверждение идей Н. Коперника, поэтому многие объясняли движение через идеи И. Кеплера. Джованни Альфонсо Н. Борелли наблюдал, что есть некоторое динамическое равновесие в поле тяготения. В 1665 году, задолго до Х. Гюйгенса, работа Дж. Н. Борелли не была такой математически просчитанной. Возникали идеи о том, что нужно рассматривать тяготение, но были проблемы, связанные с тем, что было очень сложно вывести это математически.

Вихри Декарта. Готфрид Вильгельм Лейбниц, Роберт Гук следуя за идеями Р. Декарта говорили, что видят неравномерное вращение небесных тел, что это похоже на вихри. Идея всеобщего тяготения была сложна для понимания, поэтому предполагали вихревой механизм движения, и в дальнейшем именно с этими позициями будет спорить И. Ньютон.

Механика континуума (аэостатика и гидростатика)

Важное открытие в механике континуума, открытие атмосферного давления. В античные времена утвердилась позиция Аристотеля, что есть тяжесть у разных предметов, но они не давят на землю и воду. Из-за наличия того факта, что пустоты нет, присутствует наличие этого «страха пустоты».

Когда начали делать фонтаны, то там начали делать насосы, которые с помощью разряжения должны были поднимать воду. Но больше чем на 10 метров вода не поднималась. Э. Торричелли заметил, что если заменить воду ртутью, то ртуть поднимется значительно ниже. Почему именно внешнее давление важно? Во-первых высота столба. Было замечено, что она зависит от погоды. Когда подняли прибор Э. Торричелли на гору, давление изменилось. В 1680 году Эдмунд Галлей получил правильную барометрическую формулу. После этого были исследования Р. Бойля, когда изобрели насос, который позволял сделать существенное разряжение он смог поставить эксперименты, как меняются показания барометра, и это было уже абсолютным доказательством существования атмосферного давления.

Лекция 4. Развитие механики. Механика Ньютона

Мы продолжим разговор о развитии основного раздела физики — механики. Фактически, отцом основателем является Г. Галилей, но до второй половины XVII века не было той классической парадигмы. Вся теория была в промежуточном состоянии.

Системы устройства мира

Исаак Ньютон (1643–1727). Он пришел в физику, когда формировался центр британской науки. В 1661 году он приступил к деятельности в Кембриджском университете. В 1688 году в Англии происходит «славная революция», он даже становится членом парламента. Направлений деятельности у него было очень много. Мы рассмотрим содержание математических начал натуральной философии. Тут возникает ряд интересных моментов.

Предварительные физико-математические труды

Первую часть своей жизни 1665–1666 год, важный момент, когда он по сути изобрел исчисление бесконечно малых. Считается, что весь дифференциальный аппарат был изобретен И. Ньютоном и Г. Лейбницем. Но эти труды он в полном объеме не публиковал. Только уже в самом начале 18 века возникла дискуссия с Г. Лейбницем о приоритете и тогда он их издал. Второй момент, что И. Ньютон был в значительной степени был последователем некоторых идей Р. Декарта. Ему нравилась идея локального взаимодействия, толчка. Потом, когда идея всемирного взаимодействия проникла и стала необходимым моментом его концепции, он рассматривал свой результат как некоторое дополнение к трудам Р. Декарта. По поводу трудов по оптике, интересный момент, что труды были сделаны до публикации математических начал. Тогда начинаются сложные взаимоотношения И. Ньютона с Р. Гуком. У Р. Гука были замечательные экспериментальные результаты, между Р. Гуком и И. Ньютоном возникли не очень хорошие взаимоотношения. Возникают вопросы относительно приоритета, вклада в формирование основ классической механики. И. Ньютон решил не публиковать свои труды до кончины Р. Гука. Он смог дождаться этого момента в итоге.

Математические начала натуральной философии

Здесь существуют некоторые штампы, которые не совсем корректны. Многие идеи, которые лежат в основе объяснения движения планет формировались еще до И. Ньютона и когда говорят, что И. Ньютон объяснил движение планет, то стоит понимать, что конкретно он сделал, в чем его заслуга. Если это не сделать, то возникнет неправильное понимание развития механики.

Основные моменты. Математические основы были опубликованы 1686(7) году. Некоторая неоднозначность относительного юлианского календаря. И. Ньютона уговорил на публикацию его друг и коллега Э. Галлей. Астроном, математик и физик. Главное то, что Э. Галлей методы новой механики обсуждал и с Р. Гуком, и с И. Ньютоном. Р. Гук говорил, что смог решить прямую задачу Кеплера и проанализировать обратную, на самом деле это было не так. Когда Э. Галлей увидел, что И. Ньютон эту задачу решил, он уговорил И. Ньютона опубликовать свою работу.

И. Ньютон при этом преследовал ещё одну цель. Он одновременно спорил с противоположной концепцией — картезианской. Ключевым в ней было объяснение природы воздействия через локальные силы. Последователи Р. Декарта предлагали определённый механизм. В качестве механизма брали вихри. И Г. Лейбниц был ведущим автором в попытках объяснения. Конкуренты И. Ньютона не могли создать такую же теорию, как И. Ньютон. Конструктивная часть математических начал очень сильная, при этом критика не столь убедительна. Фактически сейчас можно сделать вывод о том, что попытка создать теорию эфира не могла иметь такой же математического уровня, потому что теория сплошной среды требовала совершенно другого математического аппарата, которого тогда не было. Там были разные точки зрения.

Ещё до И. Ньютона говорили про теорию всемирного тяготения. Он считал, что тела у поверхности Земли движутся под воздействием тех же сил, что и Луна. Но для того, чтобы это подтвердить, ему нужно было знать точное значение радиуса Земли. Интересно, что Жану Пикару в те годы удалось вычислить радиус довольно точно. «Математические начала» объёмный труд, из введения и трех томов. Содержание введения популяризируется больше.

Введение

Определения

- Количество материи — масса, есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее. Атомизм И. Ньютона.
- Количество движения (скорость на массу тела).
- Врожденная сила материи сила инерции.
- Приложенная сила есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения (обычная сила).
- Центроостремительная сила — та, с которой тела к некоторой точке как к центру притягиваются.
- Ускорительная величина силы пропорциональна напряжённости поля ($m = 1$). И. Ньютон не пользуется понятием ускорения — у него лишь «скорость, производимая в заданное время».
- Движущая величина силы. Фактически идет речь только о центральных силах, но явно это не сформулировано.

Сам трактат сделан в стиле античных трудов. Сначала даются краткие тезисы,

а потом идет логическое обоснование. Определение массы может показаться странным, потому что масса объясняется через плотность. Но И. Ньютон принадлежал к атомистам и плотность воспринимал как плотность упаковки. Тогда не было однозначности понятия силы. здесь сила использовалась очень многозначно. Термин энергия возник в 19 веке, но до этого, энергия называлась живой или мертвой силой. У И. Ньютона принцип инерции тоже назывался силой. Центростремительная сила — он дополняет идеи важности центральной силы. У И. Ньютона нет в чистом виде сохранения момента силы. *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 и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.

Закон 3. Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе — взаимодействие двух тел на друг друга равны и направлены в противоположные стороны.

Следствие 2 — принцип параллелограмма сил.

Следствие 3 — закон сохранения импульса системы.

Следствие 4 — роль центра масс, аналогия с отдельным телом.

Следствие 5 — относительные движения тел. . . одинаковы «покоится ли пространство их заключающее или движется равномерно и прямолинейно».

И. Ньютон нигде не вводит ускорение. В третьем законе нет освещения центральности. В первом законе есть нюанс. Сейчас привязывают инерциальные системы отсчёта. У него упоминается, что сложно определить абсолютное движение. Но И. Ньютон считал, что имеет место точное определение абсолютного движения относительно абсолютной системы отсчёта. Он это связывал чуть ли не с богословскими идеями. При этом он понимал, что из его трудов выходит, что напрямую абсолютное движение вывести нельзя. Инерциальные системы отсчёта появились только при Ланге. Векторного исчисления тогда не было, поэтому параллелограмм сил был актуален.

Первый том — о движении тел

Движение тел в пустоте под действием «центростремительной силы»

Первый отдел — о методе первых и последних отношений — геометрический вариант математического анализа.

Второй отдел — нахождение центров сил по движениям (прообраз сохранения момента).

В третьем отделе рассмотрены как обратная задача механики, так и аналог теоремы «живых сил».

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

В 7 дано решение уравнения движения для произвольного закона сил методом сведения к неявным квадратурам (термин квадратура кривых), представленным геометрически.

В восьмом разделе рассмотрено двумерное движение .

В 10 разделе движения по заданным поверхностям (случай одного тела) + центральная сила и маятники.

В одиннадцатом разделе рассмотрена задача двух тел и сведена к задаче одного тела. Здесь синтез полного решения задачи Кеплера.

Максимальный интерес представляет первый том. Хотя он уже достиг многого в вычислении бесконечно малого, он многие вещи делал аналитически. Задача — решить прямую задачу Кеплера. Тяжелый труд, мало кто из современников его смог понять.

Особенно важен двенадцатый раздел: «задача о притягательных силах сферических тел». Это по сути основы теории гравитационного взаимодействия больших тел с непрерывным распределением массы. Здесь рассмотрен и случай частицы внутри шара, рассмотрены однородные шары и неоднородные, но сферически симметричные. Есть даже прообраз теории изображений инверсии (предтеча работы Уильяма Томсона по изображениям для поля).

Наконец в последнем, четырнадцатом разделе рассмотрена задача о движении малых частиц под действием центральных сил вблизи поверхности большого тела — фактический вывод законов преломления и отражения в рамках корпускулярной концепции света. В качестве обоснования есть ссылка на конечность в противоположность Р. Декарту, говорившему о бесконечной скорости, и на дифракцию, открытую Франческо Марией Гримальди. Два шарика, заполненные материей, должны взаимодействовать как точки. Сейчас все пользуются теоремой Гаусса. Но Иоганн Карл Фридрих Гаусс жил после И. Ньютона. Поэтому в реалиях И. Ньютона эта задача оказывается значительно сложнее.

Он рассматривал и другие задачи. Что будет, если в шаре будет канал? Сама постановка задачи стала известной и вызвала странную реакцию. Если речь идет о взаимодействии небесных тел, то кто прокопает канал к центру Земли? Такие обобщённые задачи вызвали отторжение у современников. Прошло 100 лет и с помощью метода, предложенного И. Ньютоном Генри Кавендиш смог первым показать зависимость $1/R^2$ для сил Кулона.

В четырнадцатом отделе наблюдается связь с оптикой. И. Ньютон говорит о возможных оптических частицах. Физика оказалась достаточно компактна, и есть надежда создать единую концепцию всего.

Второй том — влияние среды

Учет силы сопротивления в среде по эмпирическим формулам. В это томе больше критики, он отличается от первого. Здесь была критика вихрей. Для того, чтобы это показать он рассматривал взаимодействие тела со средой. С современной точки зрения он ничего не доказал. Механика сплошной среды до сих пор содержит неясные моменты. В XIX веке появилось что-то определённое. А в о времена

И. Ньютона были совсем простые вещи. Что силы зависят не только от координат, но и от скоростей. Сила сопротивления, например. Предложил геометрический метод интегрирования.

В четвертом разделе рассказал о лобовом сопротивлении, если тело двигается в среде под действием центральных сил.

В пятом разделе обобщение барометрической формулы, выведенной Э. Галлеем. Попытка вывести закон Р. Бойля из статической атомистической схемы. Намеки гидродинамики, чтобы утверждать, что небесные тела ни с какой средой не взаимодействуют. Газы появились в XVIII веке. До этого был воздух и непонятные газы. Но возникает статическая модель давления газа. Когда считается, что частицы отталкиваются под действием электромагнитных сил. Дальше затухающие колебания маятников. один из важных результатов — результат конструктивный. Он рассматривает гармонические волны. Свет никто не рассматривал как синусоидальную волну. А для звука синусоида была понятна. И для такой гармонической волны И. Ньютон воспользовался идеями Р. Бойля о пропорциональности плотности среды давлению и получил известную формулу для скорости звука. Получил численное значение. Но оно было не совсем корректное. Позже Пьер-Симон де Лаплас догадался, что это адиабатический процесс и изменил формулу на привычную нам.

Третий том — система мира и правила рассуждения в физике

Тоже важный. Здесь не было спора, но было применение метода И. Ньютона к реальному миру. Луна близко расположена к Земле, но где-то есть мощно гравитирующий центр — Солнце. И. Ньютон по сути был основателем еще одного математического подхода, под знаком которого прошло развитие механики. Метод теории возмущений. Этот метод зарождается, используется 200 лет и потом перерождается в атомной физике. В задачке о Луне главное тело Земля, но есть возмущающие элементы — Солнце, деформации Земли и Луны. Но это все делается методом теории возмущений. Это была самая спорная и сложная часть результатов. Было сравнение теории с экспериментом. Ж. Пикар впервые очень точно измерил радиус Земли. Все сошлось и было существенным триумфом этой науки.

Развитие механики в XVIII-XIX веке

Когда мы говорим о дальнейшем развитии механики, активно развивался сам аппарат. Все признали основные положения И. Ньютона, но читать это было невозможно. Л. Эйлер впервые пишет дифференциальные уравнения. Сначала у него появились естественные представления движения, дальше он изменил на декартовы координаты. 1788 год, аналитическая механика Лагранжа. Триумф аналитических методов, чертежи неактуальны. Можно объединять различные координаты. Но был и недостаток. Теория дифференциальных уравнений тогда не была сильно распространена. Из результатов Жозефа Луи Лагранжа вышло, что если сначала на первое место выдвигали законы сохранения и т. д. После Ж. Лагранжа разговоры о энергии утихли. Развитие аналитических методов механики. Важен не математический

метод, а множество решённых задач. И. Ньютон решил задачу двух тел, но все прекрасно понимали, что уже при движении Луны появляется зависимость трех тел. Развивается идея атомизма, механика объясняет все явления, задача Коши имеет однозначное решение, возникает демон Лапласа. Если был бы такой ум, который бы знал все начальные состояния систем, то этот ум прочитал бы будущее и прошлое. Отсюда сделали философские выводы и появился лапласовский детерминизм. Дальше возникает А. Пуанкаре, после него возникает нелинейная динамика. А. Пуанкаре доказал, что задача трех тел принципиально не интегрируема и непредсказуема.

Конец XIX века. Активизируется позитивистская философия. Она исходит из того, что метод в физике очевиден. Экспериментальный метод, обработка количественных экспериментов с последующим индуктивным обобщением. Позитивисты считали что физика сама себе философия, но философы должны оптимизировать физику, убрать всю метафизику. Внутренние противоречия. Э. Мах, как виднейший представитель, устроил анализ всей механики. Был сделан вывод о том, что нельзя прийти к абсолютному движению. Поднялись вопросы об относительности, ввели инерциальные системы отсчета. Вывод такой, что в механике нет никакого детерминизма. Индетерминизм выше, чем в квантовой. А в классической механике есть приближенные решения и динамический хаос, но это все сложно и непонятно.

Лекция 5. Физика XVIII века. Период невесомых

Сейчас мы обращаемся к XVIII веку, хотя будем заходить и в другие периоды. Развитие физики, электричества и магнетизма. Физика XVIII века имеет название — Период невесомых. Это связано с тем, что в этот период утвердилась теория И. Ньютона. Фактически помимо самой механики еще в XVII веке развивались другие разделы физики, при этом их пытались идейно построить как в механике. При этом возникали нюансы. Было представление, что есть определенный невесомый флюид (это единственный флюид, дошедший до нас) — электрический флюид. Он попадает в какое-то тело и это тело становится способным вступать во взаимодействие. При этом, по аналогии с И. Ньютоном, брали дальнедействующие силы. Были ещё картезианцы, сторонники близкодействия. Они признавали успех ньютоновского описания динамики планет, но считали, что нужно объяснять это взаимодействие каким-то механизмом.

Развитие физики электрических и магнитных явлений

В 1600 году был опубликован знаменитый труд Уильяма Гильберта «De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure » («О магнитах, магнитных телах и о Великом магните Земле»). Считается, что с этого в новую эпоху началось развитие теории магнетизма и электричества. Количественные исследования были осложнены. Сами магнитные и электрические явления были известны с древности, например, тот же компас был широко распространен. Одно из важных утверждений У. Гильберта — компас работает потому, что Земля есть большой магнит. Магнитные взаимодействия двух магнитов. Кроме того он говорил, что электрические взаимодействия универсальные, но слабые и электрические свойства пропадают быстро, минут за 10. Тогда рассматривали именно статическое электричество, поэтому все видели только притяжение. Магнитное взаимодействие присуще не всем, оно сильнее электрического. С книги У. Гильберта началось разделение электричества и магнетизма. Это все оказало существенное влияние на развитие науки.

Несмотря на интенсивные попытки разобраться в электричестве, почти 150 лет не было больших прорывов. Не было общей теории, это мешало проводить эксперименты. Зачатки были получены в 30-е годы XVIII века. В 1729 г. Стефан Грей сформулировал идею электропроводности. Шарль Дюфе начал работу над двумя зарядами, «стеклянное» и «смоляное» электричество.

Перелом в 40-х годах. Гигантское событие — открытие Лейденской банки. Стекланный сосуд с ртутью, в который вставляли гвоздь. Эффект был в том, что это вариант плоского конденсатора. Эвальд Юрген фон Кляйст опубликовал работу, где описывал сам эксперимент. Он описывал, что будет сильный разряд, если коснуться гвоздя. Годом позже голландец Питер ван Мушенбрук описал похожее устройство. Смысл этого открытия в том, что можно накапливать электричество в больших количествах. Пересмотр положений У. Гильберта о том, что электричество слабое взаимодействие. Это произвело большое впечатление на широкую публику. Именно

этот перелом и определил реальные возможности исследования физики. Можно накопить заряд и дальше исследовать. Можно лишнее убрать. В это время активно развивается Санкт-Петербургская академия наук. Георг Вильгельм Рихман изучал воздействие электричества. Электростатический потенциал можно измерять по углу отклонения льняной нити. Он в своих исследованиях зашел очень далеко, погиб в экспериментах по изучению атмосферного электричества.

Формирование парадигмы электрической науки. Это было стимулировано введением в оборот большого количества электричества. Работы Бенджамина Франклина. Существенно преуспел в экспериментальных работах: показал наличие двух типов зарядов, высказал идею о сохранения заряда, ввёл понятие появления флюида. Сначала была одножидкостная модель электричества: в теле есть определённое количество флюида. Если флюида больше, то тело заряжено положительно, если меньше флюида, то заряд отрицательный. До середины XVIII века не было единой точки зрения на то, что есть гром и молнии. Отсутствовала идея о том, что это как-то связано с электричеством. Как только появилась лейденская банка, появилась и связь с атмосферным электричеством. Б. Франклин придумал громотвод.

В XVIII веке не только возникла Санкт-Петербургская академия наук, но и благодаря грамотной политике в отношении науки, начался активный подъем науки. Франц Ульрих Мария Теодор Эпинус, отец основатель основ шифрования в Российской империи, подошел к электричеству с натурфилософской позиции и сформулировал более чётко природу электрического взаимодействия. Он говорил о том, что это дальнodelствующие силы. Формул он не писал, потому что понимал, что не сможет поставить количественный эксперимент. Сформулировал закон сохранения заряда, открыл явление электростатической индукции.

60-70-е годы. Появляются понятия о ёмкости, двухжидкостная концепция. В одножидкостной концепции не было понятно, откуда берется удержание заряда. Идеология дальнodelствия была не одинока. Были идеи картезианцев, одним из ярких представителей которых в том время был Л. Эйлер. Достаточно сложно было вывести концепцию близкодействия на тот же уровень, что концепция дальнodelствия. Это определило успех исходной метафизической идеи. Концепция близкодействия была хороша в своей изначальной формулировке о том, что всё нужно объяснять. Но тогда всё оставалось только на уровне разговоров. Михаил Васильевич Ломоносов во многом был именно картезианцем. У него присутствовали определённые флюиды, как вихри Декарта.

Гипотеза $1/R^2$. Чтобы эта гипотеза получила распространение, её нужно было проверить. Просто так в неё люди не могли поверить. Дальше всех в этом направлении продвинулся Г. Кавендиш. Он воспользовался теми результатами, что были получены ещё у И. Ньютона. Только в случае $1/R^2$ электричество сферы внутри не будет действовать на внутреннюю вложенную сферу, а перетечёт на внешнюю. Коллегам эксперимент Г. Кавендиша не был известен. Поэтому вся слава принадлежит Шарлю Огюсту Кулону.

Исследования Ш. Кулона опубликованы в мемуарах в 6(7) томах. Что-то осталось от У. Гильберта, аналогия между электричеством и магнетизмом. Ш. Кулон часть исследований посвятил электричеству, часть магнетизму. Он написал про

плюсы и минусы магнитные. Магнитные диполи можно представить как смещенные электрические заряды. Взаимодействие диполей похоже на электрическое. Показал структурную схожесть законов электричества и магнетизма. Важная роль в создании крутильных весов, первым предложил взять тонкую длинную проволоку в качестве подвеса. Весь эффект заключается в том, что у длинной проволоки очень маленький коэффициент жёсткости. Сдвиговая деформация не перемешивается со сжатием. Никакой теории упругости тогда не было, дифференциальные уравнения возникли после, модули деформации возникли позже. Человек вывел важную формулу, когда не было самой теории. Очень точный прибор, позволял измерять малые моменты сил. Все базовые положения электростатики. Закон Кулона. Г. Кавендиш с помощью методов Кулона смог определить гравитационную постоянную. Определить силу взаимодействия двух предметов.

1800 год, следующий этап в физике электричества, открытие гальванического элемента. В честь Луиджи Гальвани. Сам он объяснял это с точки зрения живого электричества. Алессандро Вольты создал прообраз гальванического элемента и объяснил.

Развитие теории тепла

К разговору о физике тепла. Аристотель о теплоте говорил как о некотором качестве, присущем некоторым предметам. Некоторые тела могут его приобретать. На этой идее основывались и другие исследования уже в Новое время. Здесь рождаются две знаменитые противоположные конструкции тепла: теория теплорода и кинетическая теория.

Теплород — некоторый флюид, теория активно развивалась в XVIII веке. Отец основатель Г. Галилей, попытался первым измерять тепло с помощью идей теплового расширения. Попытался использовать свойства воздуха. Создал прибор для определения степени нагретости, в котором вода из чаши поднималась по столбику, назывался термоскопом Г. Галилея. Но тут был компромисс между измерением атмосферного давления и температуры. Попытки измерений начались еще в XVII веке. Была в значительном степени история как с электричеством, сложно было измерить нагретость тела точно. Попытки сделать термометры были весь XVII и начало XVIII века, но эффективность была очень низкой. Преодолеть их очень и очень сложно. Когда удалось создать термометр, оказалось, что важно качество стекла, важно прокипятить ртуть, чтобы в ней не было воздуха. Очень много технологических моментов. Было много плохих предметов, которые не давали воспроизводимые результаты. Было создано три термометрических шкалы. Шкала Цельсия, основанная на воде, шкала Реомюра — основанная на спирте, и шкала Фаренгейта. Перелом технологический, идея использовать тепловое расширение была давно. Оказалось, что ртуть самая удобная в этом плане.

Исследования по калориметрии

1740 г. Г. В. Рихман. Важны именно количественные эксперименты. Идея теплового баланса возникла впервые в нашей стране. Как только появились приличные термометры, можно было показать температуру смеси. В это время ещё нет понятия теплоёмкости. Просто сумма температур поделённая на массу. Теплоёмкости были нужны. У Г. В. Рихмана были отклонения от результатов от ожидаемых, но он их объяснял тем, что часть тепла теряется в окружающую среду.

Дальше, теплоёмкости появились только через 40 лет. Фазовый переход и скрытые теплоёмкости появились чуть раньше. После того, как разобрались, как правильно писать уравнение теплового баланса. Но тут возник вопрос, как описывать тепло. С одной стороны температура — мера нагретости тела, с другой стороны количество теплоты, теплоёмкость. Возникла простая интерпретация: есть теплород, который проникает в поры тела. Чем его больше, тем тело теплее. В электричестве есть заряд и потенциал. И тут пытались ввести аналогичные величины. Теплоёмкость. Помогала посчитать баланс теплорода.

Существенный толчок получила концепция теплорода за счёт простоты интерпретации. Можно напрямую измерять количество теплорода (что сейчас называют внутренней энергией) и температуру. Джозеф Блэк фактически формирует парадигму учения о теплоте. Существенно, что, по сути, тогда уже упоминалось свойство тепловых явлений, которое радикально отличало их от других явлений — самопроизвольное выравнивание температур. Это потом послужило развитию второго закона термодинамики. Начиная с Г. В. Рихмана и у Дж. Блэка была температура смеси, необратимость тепловых явлений. Тогда это было воспринято по аналогии с жидкостью в сообщающихся сосудах. Количество жидкости — теплород, высота жидкости — температура. При образовании сообщающихся сосудов устанавливается общая высота. Сейчас мы понимаем, что так объяснить нельзя. Что из-за силы тяжести у нас в жидкости всегда будут колебания, а остановка жидкости вызывается с трением, вязкостью и т. д. Корректно объяснить теорию тепла нельзя. Но тогда это казалось хорошим объяснением. Кинетическая идея не позволяла так качественно всё объяснить.

Кинетическая теория тепла

Началось это ещё с Р. Декарта, полагавшего, что электричество само есть результат движения флюидов. Тоже и с теплотой: не теплород попадает в поры, а само тепло есть движение эфира. Потом эта теория получила развитие в XVIII веке. Л. Эйлер, Даниил Бернулли, М. В. Ломоносов — все они были сторонниками кинетической концепции тепла.

Если говорить про М. В. Ломоносова, то тогда ещё не было серьёзных результатов, баланса тепла ещё не было и в середине XVIII века концепции теплорода и кинетической теории были на равных. По физике у М. В. Ломоносова было не очень много работ, но хорошо прослеживаются метафизические взгляды. Размышляя о происхождении теплоты и холода, он чётко говорил о живой силе частичек, которые

образуют тепло. Он был не чистым картезианцем, в его взглядах присутствует атомизм. У Р. Декарта не было атомов. У М. В. Ломоносова «нечувствительные физические частицы», которые могут сталкиваться, взаимодействовать, но сохраняют свои свойства.

Обратим внимание, что свойства воздуха очень важны. Тепловые свойства существенны, но плохо «диагностировались». В физике очень важен состав воздуха, но состав — достижение химии и существенно они проявились только в конце XVIII века. Тогда же не было понятия газа, только некий воздух с неопределённым составом. Тепловые свойства воздуха сильнейшим образом зависят от паров воды. Сухой и влажный воздух совершенно различаются. В воздухе постоянно происходят фазовые переходы, все эти процессы обладают гигантскими скрытыми теплотами, и, если это не учитывать, то тепловые свойства оказываются совершенно неясны.

Так было и в эпоху М. В. Ломоносова. Понятно было, что нужно объяснять кинетические тепловые свойства твёрдых веществ. М. В. Ломоносов, как атомист, считал, что атомы плотно упакованы, а тепловое движение — вращательное движение. Вывод закона Р. Бойля кинетическим способом. Р. Бойль был атомистом, он говорил, что молекулы друг от друга отталкиваются. В XVIII веке появилась идея, что давление можно объяснить ударом. У М. В. Ломоносова интереснее, что учитывается столкновение, в котором частицы обмениваются теплотой и поступательным движением. Но сам М. В. Ломоносов пытался её отделить от самой проблемы теплоты.

Идеи хорватского философа Рожера Йозефа Босковича (1759 г.)

Физика тогда ещё не закрылась совсем от внешних влияний. Р. Боскович был скорее философом, прямых физических трудов он не писал. Р. Боскович смотрел несколько со стороны на физику. Он предложил несколько изменить конструкцию атомизма. Пусть атомы есть, но это особые точки пространства, которые на большом расстоянии ведут себя как силы гравитации, т. е. притягиваются, а на близком расстоянии ведут как отталкивающиеся. А в промежутке возникает переколебание — несколько петель синусоиды. Возникает возможность наличия нескольких точек равновесия. Эта конструкция вполне стыковалась с идеями И. Ньютона. Но был интересный момент. Эта конструкция оказала сильнейшее влияние на картезианцев. Майкл Фарадей был вдохновлён идеями Р. Босковича, да настолько, что у него все тела исчезали, всё пространство оказывалось заполненным силами. Возникает теория электромагнитного поля.

Причины упадка кинетической теории тепла после середины XVIII века

Концу XVIII века свойственен упадок интереса к кинетической теории со стороны физиков. Имеет место успех этой математической части этой теории, здесь ещё нет знаменитых исследований по теплопроводности. Молекулярно-кинетическая

теория имела ряд трудностей. Она во многом была теоретическая. У теорий получался разный статус. К тому же кинетические теории обладали ещё одним общим недостатком. Они были очень сложными математически.

Открытие лучистого тепла. ИК-лучей. Если мы стоим на теории вещественного тепла, то теплород может передаваться через пустоту. Потом оказалось, что лучистое тепло обладает возможностью фокусировки, дисперсии и отражения. Мы видим триумф ньютоновских концепций в теплоте — концепция истечения, а кинетическая теория стала маргинальной. Когда возникает вопрос об атомизме иногда слишком выстраивают в один ряд достижения древних философов с современными положениями. Это был философский атомизм. Естественно-научный атомизм возникает только в конце XVIII века. Химия стала утверждаться в конце XVIII века. Понятие химического элемента, простое и химически сложное вещества. У Джона Дальтона возникает идея химического элемента. Идея кратных весовых соотношений, атомных весов. А химический атомизм до этого никакой естественно-научной основы не имел.

Лекция 6. Развитие электродинамики и оптики

Если XVIII век был эпохой невесомых, развитие по аналогии с небесной механикой, то остальные разделы физики развивались по аналогии, но автономно. В теплоте свой теплород и т. д. Есть осязаемые и жёсткие перегородки между разделами физики. В начале XIX века начинается обратный процесс, начинают перегородки ломаться.

Постоянные токи. Электродинамика дальнего действия.

Важная веха, открытие постоянных токов, гальванических элементов. Заслуга А. Вольта в том, что можно убрать все биологические агенты. Идеи создания гальванических элементов. Потом, при последовательном соединении гальванических элементов, был создан вольтов столб. При попытке замкнуть гальванический элемент возникала искра. Сначала это связывали с лейденской банкой, но гальванический элемент не разряжался. Была идея о некоторой поляризации. Искра могла переходить в вольтов дугу. При замыкании цепи происходит выделение тепла. Количественно не рассматривали, но отмечали выделение тепла.

Химическое действие — электролиз. Эта эпоха самое начало и понятие химического элемента еще не до конца устоялось. Ток никто мерить не умеет. Законы Фарадея были намного позже. Электролиз как некоторый процесс наблюдается. Электролиз воды, газы в этот момент уже известны. Дело доходит до самого главного. Ток не может быть без магнитного действия. Это было открыто Хансом Кристианом Эрстедом. Взаимосвязь магнетизма и электричества. Слом перегородки между двумя направлениями. Магнитная стрелка поворачивается при включении цепи. В этот же момент к исследованиям подключается Андре-Мари Ампер. Тут часто возникает путаница. Концепция взаимодействия токов. Промежуточная концепция. Некоторый возврат к Р. Декарту и картезианцем. Есть элемент тока. А. Ампер к этому вопросу подходил осторожно. К вопросу природы тока. Возникает понимание как мерять ток с помощью магнитного действия, но природа его не ясна. Однозначности о том, что ток есть движение зарядов пока нет. Элементы тока обозначаются как вектора. Нет объемных токов, все они линейные. Речь идет о центральных силах, как и в законе тяготения. Оригинальное амперовское выражение совершенно не похоже на то, что мы изучаем сейчас. Из принципиально нового возникает зависимость от углов. Гипотеза А. Ампера. Это такое предположение что постоянные магниты — это конструкции скрытых молекулярных токов. Что есть открытые — гальванические элементы и скрытые — токи на микроскопическом уровне. Тут возникают свои проблемы, если взять большой кусок железа, то там токи должны быть очень сильные, чтобы соответствовать этой теории. Магнитный момент электрона нельзя свести к классическому заряду.

Открытие законов Ома. Сам метод экспериментирования Георга Симона Ома. Использовал довольно тонкие измерения, гигантский диапазон линейности. Применение крутильных весов. По углу поворота магнитной стрелки. Нужно как-то менять напряжение. Медь нормированный источник тока. Напряжение немного

меняется, потому что гальванический элемент стареет. Тогда уже придумали новое устройство. Термобар. Стабильная разность потенциалов. Можно нормировать и измерять напряжение. Только с работ Г. Ома можем стандартный набор величин использовать. Сила тока, напряжение. Сила тока присутствует и у А. Ампера, но там было не до конца понятно, что это. Здесь же сформировались основные понятия. Квазистационарные токи не только постоянные, но есть и переменные.

Электродинамика Гаусса — Вебера

Электродинамика дальнего действия. Единая идеология. Существенным моментом электрический атомизм. Эти работы более продвинуты, чем М. Фарадея и Джеймса Клерка Максвелла. Здесь однозначно высказывались идеи о природе тока. И. Гаусс сделал так, чтобы все зависело от относительных скоростей, ускорений, но никак не от абсолютных. Он сделал симметричную систему, что положительный и отрицательный ток движется навстречу друг другу с одинаковой скоростью. Сейчас мы понимаем, что это не так, но у него было так. Предполагалась такая система, что все окружающие тела состоят из нейтральных и заряженных частиц. Заряженные частицы взаимодействуют с определённой силой. Силы центральные. Это те самые силы, как и гравитация.

Вильгельм Эдуард Вебер провел эксперимент и посчитал константы. Через заданный проводник протекает заданный заряд, посчитать количественно соотношение кулоновских и амперовских сил. Появление скорости света в теории. Скорость света — когда сила Кулона равна силе Ампера. Взаимодействующие параллельные токи, движущиеся в одну сторону. Параллельные токи будут отталкиваться по Кулону и притягиваться по А. Амперу. При определённой скорости сила обратится в ноль. Эта скорость и есть скорость света.

Развитие оптики до середины XIX века

Активно развивалась в XVII веке, но не так активно как механика. Был открыт закон преломления света. Геометрическая оптика оформилась к XVII веку. В оптике возникает два подхода.

Корпускулярный — теория истечения и волновой. Исследовали интерференцию, дисперсию. Корпускулярная идея позволила более количественно привязаться к цвету, монохроматичности. Там получается что скорость связана с цветом.

Х. Гюйгенс, Р. Гук — волновая оптика. Но это наука не объясняла цвет никак. У Х. Гюйгенса были идеи, объяснявшие двойное преломления. Это были колебания эфира. Те некоторые всплески, которые могут распространяться в пространстве, но это далеко не те гармонические волны, что есть сейчас. Есть понятие конечности скорости света. Это было качественное понятие. Что что-то распространяется с определённой скоростью. Это стало доступно не сразу.

Вторая половина XVII века. Олаф Ремер. Подтвердил факт конечности скорости света. Модуляция моментов прохождения спутников Юпитера. Аберрация света звезд.

Астрономические наблюдения Джеймс Бредли как способ измерения скорости света. Они базировались на корпускулярной теории. Его значение получились близки к О. Ремеру. При этом точность относительно современных чисел была далека.

Знаменитые эксперименты Армана Ипполита Луи Физо и Жана Бернара Леона Фуко. Зеркала и шестерёнки. Впервые измерение скорости света в земных условиях. Их значение было точным до 4 знака.

Концепция И. Ньютона постепенно утверждается. Возникали при этом вопросы. У И. Ньютона скорость света у разных цветов должна быть разная, кроме того, интересно было проследить влияние движения источника. Необходимая точность была достигнута только в середине XIX века. Во времена И. Ньютона не умели изучать интенсивность света.

Опыты Пьера Бугера, Иоганна Генриха Ламберта и Августа Бера (1750–1760 гг.). По серому клину. Человеческий глаз умеет очень хорошо относительную яркость измерять. Человеческий глаз плохо определяет абсолютные значения. Относительные — хорошо. Этим способом создали устройство по измерению интенсивности.

Идеи Леонара Эйлера о природе цвета

Довольно существенный вклад. «Письма к немецкой принцессе», идеи о том, что картезианские волны (как звуковые волны), высказал гипотезу о новой волновой оптике. Идея синусоидальной волны, длина которой связана с цветом.

Все окончательно началось с Томаса Юнга. У Т. Юнга характерно то, что волны продольные. Там же есть момент, упругий эфир. Существенно то, что тогда никакой теории упругости не было. Были только крутильные весы Ш. Кулона. Формируются зачатки теории упругости. У Ш. Кулона возникает поперечный сдвиг. У Т. Юнга — модуль поперечного сжатия. Записал как выражается скорость таких волн в среде. Никаких дифференциальных уравнений у него не было.

Опыт Юнга — компромисс между дифракцией и интерференцией. Кольца И. Ньютона были получены ещё в XVII веке, но сам И. Ньютон их затруднялся объяснить. Тут их объяснили. Смогли измерить длину волны. Когда с Т. Юнгом связывают интерференцию, нужно помнить, что дифракцию он тоже разобрал. Она ни чуть не хуже теории Огюстена Жана Френеля. Здесь сошлась традиция. Дифракция — приближённое решение волнового уравнения. У Т. Юнга грамотно выводится асимптотический ряд. Метод О. Френеля оказался более удобным. Это события начала XIX века, переворот в оптике. Но не все сразу на это перешли. Слишком сильны были позиции корпускулярной теории. 1807 год, открытие поляризации. Оказалось, что двойное преломление возникает не из-за кристалла, а из такого простого процесса, как отражения от простой поверхности. П. Лаплас он понял, что у света есть стороны, асимметрия. Он высказал предположение, что для корпускул это как раз проще определить, чем для волн, которые одинаковы и в поперечном сечении.

Оптика Огюстена Жана Френеля

Начинал с замечательных успехов дифракции. Он решил целый ряд задач. Дифракция Гюйгенса — Френеля. Когда пришлось объяснять оптику поляризации возникла идея как связать волновую теорию с поляризацией. Идея о поперечности колебаний светового эфира. О. Френель пишет две серии работ. Поляризация – явление при отражении света от плоской поверхности. Второе, детектором поляризации был исландский шпат, нужно было создавать кристаллооптику, чтобы прогнозировать такие кристаллы. По-прежнему нет теории упругих колебаний. Часто возникает вопрос о практической значимости и стимуляции развития науки. Прикладная наука возникла на базе абсолютно абстрактных задач. На базе упругого эфира. Потому что воздух не годился. В работах О. Френеля нет систем дифференциальных уравнений. Волна падает на границу двух сред. Было использование граничных условий без дифференциальных уравнений. Довольно четко дается интерпретация колебаний — сдвиг упругого эфира. Возникают граничные условия. Нормальный компонент у О. Френеля разрывный. Его за это критиковали. Были законы сохранения для этих волн. В теории кристаллооптики все делается по О. Френелю. Раздел двух сред, если это кристалл, то меняется модуль сдвига. А в обычной задаче меняется плотность, а упругость одинаковая. Совершенно непонятно, как он до этого дошёл. Ещё он предсказал эффект — частичное увлечение света эфиром. Что скорость света не складывается со скоростью среды. Такой базовый элемент — механика сплошной среды развивался под влиянием оптики, при этом теория дифференциальных уравнений начала активно развиваться.

Формирование математической теории упругости

Весь период отличался своеобразными требованиями. Сама математическая конструкция должна была быть понятна. Если среда изотропная, упругая, то получается что волны в такой среде и продольные и поперечные. А теория развивалась только на базе поперечной волны. Нужна была понятная конструкция, объясняющая такое. Нужно было объяснить, что за эфир, в котором только ротор остается. Джеймс Мак-Куллах в итоге придумал такой эфир, взял систему гироскопов. Ось гироскопа: пропускают движение, но не дают проворачивать. Если взять последовательную модель сплошной среды, то Джордж Грин (1837 г.) предложил взять естественные граничные условия. У него получилось иначе, чем у О. Френеля. Появилась альтернатива О. Френелю. Реалистичная теория и противоречие эксперименту.

Лекция 7. Концепция электромагнитного поля Фарадея — Максвелла

Исследования М. Фарадея 30–50-е гг. XIX века. Особенностью этой эпохи было возрождение идей Р. Декарта. Ломка перегородок между разделами науки. Возникает электромагнитная концепция света.

Предпосылки. Идеи близкодействия. На рубеже веков развивалась теория потенциалов. Метод оказался очень эффективным. Независимо от Дж. Максвелла и М. Фарадея развивается метод потенциала в электродинамике. Есть известный подход, основанный на потенциалах. Рудольф Юлиус Иммануил Клаузиус занимался теорией диэлектриков и вводил векторные и скалярные потенциалы.

Майкл Фарадей (1791–1867 гг.)

Был без стандартного университетского образования. Изначально был лаборантом. Экспериментальное доказательство единства всех видов электричества. Основная заслуга в том, что за всем этим есть единая природа. Именно в этих обобщающих заключениях он высказывает о том, как все это устроено. В основном это были именно качественные наблюдения. Знаменитые силовые линии. Описывают конфигурацию электричества и магнетизма, что помогало ему в аргументации. Если обобщать — главная идея была концепция близкодействия. Имеет место эфир, который заполняет все пространство. Происходит деформация пространства. Он говорил о том, что если состояние меняется, то будет электрическое действие. Проводник лишь индикатор. Формируется образ поля. Исследования по электролизу. Исследования в области химических процессов. Раньше не было меры электрических явлений. Когда смогли измерить силу тока выяснили пропорционально возникают химические изменения. Влияние среды на электромагнитные явления. М. Фарадей и Дж. Максвелл считали, что пространство может быть заполнено диэлектриком или совершенно пустое, что это по-сути, равнозначно. Искать связь оптики с электричеством и магнетизмом. Эффект Фарадея. Вращение плоскости поляризации а магнитном поле.

Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879)

Математизация идей М. Фарадея на основе оптики и математических моделей упругой среды — эфира. Дж. Максвелл в своей серии трудов использует модель для электричества, но не применяет для магнетизма. Заряды рассматриваются как источники. Отрицательные заряды являются стоками. При рассуждении о магнетизме были рассуждения по аналогии. Дифференциальное уравнение в частных производных.

1861–1862 г. «О физических силовых линиях». Это вторая часть работ Дж. Максвелла. Здесь уже появляется что-то новое. Много не совсем так, как в современной физике. Самое главное достижение создание единой квазимеханической

конструкции. Считал что в упругой среде есть угловое смещение и вихревое. Математическое описание вихрей, которые описывались ещё Р. Декартом. Появляется оператор ротора. Механическая модель среды, где есть баланс давления. Но при этом если мы рассматриваем линии магнитной индукции, то это давление разное вдоль линий и поперек. Баланс давления основной метод выстраивания. Если мы возьмем современную гидродинамику, то увидим, что наука не до конца развита.

Есть тангенциальные разрывы. Течение когда два слоя жидкости параллельны, но распространяются с разной скорости оказывается неустойчивым. В теории Максвелла с одной стороны жидкость все течет, с другой стороны есть принцип суперпозиции. Если вихри крутятся в разные стороны, то будет противоположное направление скоростей. В реальной гидродинамике есть тангенциальные разрывы, а у Дж. Максвелла был принцип суперпозиции и все было гладко. В эту систему на равных правах входят те уравнения, которые мы относим к уравнениям второго круга. Материальные уравнения могут быть как нелинейными, так и могут иметь место. Все зависит от среды. У Дж. Максвелла ничего такого не было. У него был стандартный вариант базовых уравнений. Магнитное поле считалось аналогом угловой скорости. А индукция связана с плотностью массы. Есть угловая скорость, а есть угловой момент количества движения. Все это входило в интерпретацию. Если мы говорим о энергии, то по выводам получалось, что волны могут только поглощаться, но не распространяться. Впервые возникает преобразование полей. Обсуждение о том, как формируется электрическое поле. Есть уже волны, но нет волнового уравнения. Получена скорость этой волны. Это было уже после теории В. Вебера. Скорость света проникает в теорию электричества. Волны оказываются поперечными. Непонятна природа тока. Сейчас мы говорим, что это движение заряда. У В. Вебера это есть, а у Дж. Максвелла нет. Соединение теорий происходит только у Гендрика Антона Лоренца.

Экспериментальное обоснование теории Максвелла

Существенную роль диэлектрической проницаемости обратил внимание М. Фарадей, а Дж. Максвелл поставил эту величину в формулу для скорости света в среде. Скорость света в Земных условиях достаточно точно определяли уже в 50-е года. Те, кто серьезно отнёсся к работам Дж. Максвелла занялись изучением диэлектрической проницаемости. Но многие не учитывали, что есть еще дисперсия — зависимость диэлектрической проницаемости от частоты. Ситуация для теории Максвелла сложилась странно. Центром физики была Германия и там она мала привлекла ученых. Получилось, что какой-то проверки не вышло.

Ситуация меняется к 80-ым годам. Теория Вебера изначально была нормальная и складная. Но потом возникает закон сохранения энергии. Попытка разобраться во внутренних противоречиях и выяснили, что силы не должны зависеть от ускорения. Если не так, то можем получить эффективную массу. И масса будет определяться ускорением. Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц сам попытался разобраться в электродинамике и ее модернизировать. Создал свою собственную теорию, без волн. Альтернативой была теория Максвелла. Г. Гельмгольц стимулиро-

вал Генриха Герца. Ему надо было определить, кто прав. Ситуация здесь серьёзно изменилась, но там было важное открытие, опыт Генри Роуланда. Это определение магнитного поля, доказательства что магнитное поле при конвективном токе будет точно такое же, как и ток проводимости в нейтральном токе. Теорию Максвелла стоило чуть пересмотреть, но Г. Герц на фоне опытов Г. Роуланда рассматривает новую природу тока чисто связанную с движением заряда.

Результаты Г. Герца стоит делить на экспериментальные и теоретические. Можно сделать плохой конденсатор. К этому времени уже была известна формула колебательного контура. По формуле Томсона получается высокая частота, а у Г. Герца получалось приличное напряжение. Второй момент, это не просто цельный проводник, потому что непонятно, как собрать заряды. Он догадался сделать разрыв и управлять через разрыв. В результате пробоя цепь заряжается и возникает колебательные движения. Он получил доказательства теории Максвелла. Получил стоячие волны. В качестве приемника Г. Герц использовал контур. Длина стоячей волны была такая, которая следовала из теории Максвелла. Длина волны у Г. Герца была примерно полметра. Но он выступил и как теоретик. Создал теорию дипольного излучения. Если разорвать связь закона Ома с током. Что нужно посмотреть реальную природу тока, то можно сформировать теорию излучения. Классическая теория излучения. Излучением называется не распространение, а формирование излучения из других форм энергии. Теорию дипольного излучения и есть теория созданная Г. Герцем. У Г. Герца был простейший диполь. Потом это было уточнено Г. Лоренцом, Полем Дираком. Если система состоит из большого количества диполей, то там возникает много других эффектов.

Петр Николаевич Лебедев (1866–1912). Смог повторить опыты Г. Герца. Давление света.

Последующее Развитие

Теория Герца. Оливер Хэвисайд записал уравнения Дж. Максвелла в операторном виде. Джон Генри Пойнтинг в общем виде проанализировал закон сохранения энергии. Показал вектор плотности потока энергии. Общий закон сохранения энергии. Особое свойство магнитного поля — существование специального тензора, описанного А. Пуанкаре. Отец основатель концепции электрона Джозеф Джон Томпсон еще до открытия электрона задумался о том, что если все учесть по теории Максвелла, Г. Роуланда. Что будет, если этот шарик будет иметь скорость. Дает идею возникновения точечного тока из-за движения этой частицы. В приближении магнитное поле зависит от скорости в первой степени. Полная энергия будет пропорциональна квадрату скорости. Вклад в кинетическую энергию связан с электромагнитным полем. когда стали дальше развивать, то магнитная энергия зависит более сложно. В принципе, заряженная частица должна обладать массой, зависящей от скорости. Это возникает в базовых схемах, основанных на теории Максвелла. Зависимость массы электрона от скорости была сформулирована в этих трудах.

Лекция 8. Формирование молекулярно-кинетической теории

Произошли существенные изменения в физике тепловых явлений и возникновение микроскопической модели вещества, молекулярно-кинетической теории вещества. Утверждение химического атомизма.

Физика газов

Корни науки связаны с античной натурфилософией и атомистической концепцией была одной из важных. Большинство отцов-основателей новой физики, например И. Ньютон, были атомистами. Но это все еще была философская концепция. Считается что Р. Бойль тоже был атомистом. Ситуация начинает существенно меняться в конце XVIII – начале XIX века. Физика газов.

Постоянство химического состава Жозефом Луи Прустом. До этого существенную роль сыграли газы. Открытие и исследование газов стало возможным ближе к XIX веку, потому что химический состав воздуха определился именно тогда. Появилось представление о компонентах, которые входят в состав, о соотношении. Очень важным, относительно тепловых свойств, была установлена роль воды, водяного пара в воздухе. Дж. Дальтон прежде всего был великим химиком. Основателем теоретической химии. Не просто идея химического элемента возникает, идея количественного измерения. Вес элемента. Идея о том, что свойства зависят от атомного веса. Речь шла о постоянстве химического состава, что есть простейшие химические элементы, и что мы можем посмотреть, какие пропорции возникают. И Дж. Дальтон, и Жозеф Луи Гей-Люссак пришли к выводам о том, что в реагирующих газах не только кратные весовые соотношения, но и кратные объёмные. На этом утвердилась молекулярная идея. Тогда не было идеи молекулы. Почти все известные тогда газы были двуатомные, на самом деле, но идея тогда только возникла, поэтому при попытках записать даже самых простых количественных уравнений возникали ошибки неясности. Идея молекулы противоречила идее сродства Йенс Якоб Берцелиуса. Была идея что у молекул есть заряд и они притягиваются. Но в 1811 году возникает идея Амедео Авогадро о двухатомности молекул газов. Поперёк существовавшей теории. Идея атомизма сменилась, теперь это была научная идея, начали формироваться нормальные химические веса. Но это было не сразу. Все решали пропорцией, потому что никто не знал, сколько частиц в объёме. Возникло понятие моля вещества. Число Авогадро появилось намного позже. Это было достижением трудов Макса Планка. Почти весь XIX век число частиц было неизвестно. Атомистические идеи не были связаны с тепловыми явлениями. Тепловые газовые законы формируются позже. Дж. Дальтон был сторонником идеи теплорода. Единое свойство газов — одинаковый коэффициент теплового расширения. Определение простых свойств газов. Бенуа Поль Эмиль Клапейрон в 30-е годы объединил газовые законы, написав уравнение состояния.

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

Продолжение подъема картезианских настроений, при этом продолжает развиваться идея вещественного тепла. Вершиной является установление закона теплопроводности Жаном-Батистом Жозефом Фурье. Аналитическая теория теплоты. Раньше явления переноса в электричестве, закона Ома. Первое явление переноса, установленное в дифференциальной форме. Попытки были и раньше. Чем выше разность температуры тела и окружающей среды, тем больше теплоотдача. Идеи этого можно увидеть еще у И. Ньютона. Во времена И. Ньютона теплоту было сложно мерить, поэтому это были лишь предварительные выводы. Ситуация меняется, потому что рассматриваемая эпоха, это эпоха утверждения математических методов связанных с дифференциальными уравнениями, производными. При этом у Ж. Фурье, несмотря на его приверженность идее теплорода, получилось создать неплохую теорию. Позже появляется закон Ома. Плотность тока пропорционально градиенту потенциала. Из этих различных величин незыблемым в наше время оказался только закон сохранения заряда. Тепло может рождаться из ничего, из работы. В аналитической теории тепла было и другое уравнение. Уравнение стационарной теплопроводности. Уже для температуры. Ж. Фурье сделал важный шаг. Он для решения этих уравнений применил метод, который потом распространили на решение других дифференциальных уравнений. Это метод Фурье, ряды Фурье.

Еще интересный результат был получен в теплопроводности. Закон теплоёмкости твердого тела, закон Дюлонга — Пти. На его интерпретации покоилась молекулярно-кинетическая теория Максвелла и Л. Больцмана. Это была эпоха, когда внимательно изучали теплоёмкость. Точные измерения мы находим в XIX веке. Закон заключается в том, что молярная теплоёмкость это определённое число. Возникает понятие моля. Начало 4 десятилетия XIX века — революция в этом разделе физики. Переход от теплорода к другой концепции. Кинетическая концепция становится более популярной.

Предпосылки:

Обратила на себя практическая компонента. Есть штамп о том, что если есть запрос от общества, то науки отвечают на этот спрос, но это не так. Когда говорим о фундаментальной науке, не нужно требовать от нее практического применения. Но есть и исключения. Физика тепловых явлений родилась от практики.

Паровые машины. Были изобретены в XVII веке и совершенствовались без опоры на теорию. Но популярность и практика применения привела к определённым выводам инженерам. Карно говорил о том, что нужно мерой действия тепловых машин называть работу. Работа была связана с сохранением энергии и связана с интегралом движения. Инженеры видели, что их действия как раз работой и определяются.

Продолжалась тенденция ломания перегородок между науками. Возникновение электромагнетизма. Исследования реальных превращений различных типов физических явлений друг в друга и необходимости введения единой количественной меры таких превращений. К концу XVIII века утвердлась вещественная теория

тепла — из-за ИК-лучей. Но потом оказалось, что теплоту можно передавать и через пустоту. Что теплота отражается как свет. Многие роднит ИК-лучи и свет по свойствам. В конце XVIII века свет тоже воспринимался как корпускулярная гипотеза. И когда тепло передается от тела 1 к телу 2, то это мог быть тоже теплород. Концепция в XIX веке радикально меняется. Свет становится волной. Кинетическая концепция и для тепла становится более естественной. И в философии тоже возникают идеи о единстве и взаимном превращении различных явлений.

Майер, Гельмгольц, Джоуль

К концу 40-х годов уже спорили не о том, какая концепция более правильная а о том, у кого приоритет. Сейчас в качестве примера рождения тепла из ничего можно приводить примеры сверления и трения. Бенжамин Томпсон Румфорд наблюдал сверление жерл артиллерийских орудий. При этом выделялось огромное количество тепла. В рамках концепции теплорода нужно было объяснить, откуда столько энергии. Сейчас это бы потребовало рассказа о диссипативных силах, но тогда говорили проще, что теплород выдавливается. Ситуация начала резко меняться в 40-е годы. Закон сохранения и превращения энергии — один из важнейших законов. Перегородки между науками стали меняться. Главное заключалось в демонстрации взаимного превращения. Существует некая мера измерения превращений. Все хотели создать единую теорию всего, но это не всегда получалось.

Три человека традиционно считаются создателями закона сохранения энергии. С одной стороны возникает единая величина — энергия, с другой стороны самые большие последствия сказываются на физике тепловых явлений. Для других наук это было просто некоторое дополнение. Что касается тепловых явлений, то этот закон коренным образом изменил природу тепла.

Юлиус Роберт фон Майер (1814–1878)

Врач, физикой интересовался, но обладал нужным образованием. Все соображения шли из философских и практических концепций. Количественно измерить тепловой баланс человека очень сложно и сейчас. «О количественном и качественном определении сил», «Замечания о силах неживой природы». Соотношение Майера. C_p и C_v были хорошо известны, но интерпретации никакой не было. Ю. Майер обратил внимание на соотношение. Смог получить такую вещь как механический эквивалент теплоты. Калории были мерой теплорода. Показал связь механических единиц с количеством теплорода. Это и есть механический эквивалент теплоты. Догадался как интерпретировать чужие эксперименты. Интересен феноменологический подход. В деталях что такое тепло он не очень говорит. Было ясно, что теплород здесь не подходит, но есть взаимопревращение сил природы. Терминологическая путаница. Термин силы используется в разных концепциях. К концу 40-х годов его теории стали более популярны.

Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц (1821–1894)

Тоже был врачом, но хорошо разбирался в физике, много внес всего. Приобрел большой авторитет. Вдохновил Г. Герца на исследования излучения электромагнитных волн. Подходил к вопросам с точки зрения теории. Все тела состоят из атомов и молекул. Между ними действуют силы дальнего действия. Он был противником витализма. Но у него были своеобразные аргументы. Он утверждал, что организмы не вечные двигатели, и что нужно вводить законы сохранения. По его мнению единственная микроскопическая система, подходящая под это была система атомов с дальнедействующими силами. Тогда будет сохраняться энергия и вечного двигателя не получится. Это утверждение было не совсем правильно, но он стал отцом-основателем микроскопической концепции.

Кинетический подход. Суждение о применении закона сохранения энергии к электромагнитным цепям. Он внес существенный вклад. Было понятно, что есть различные виды явлений. Если в цепи есть мотор или генератор. В зависимости от ситуации устройство может и создавать ток и совершать механическую работу, и в таких системах интересно записать уравнение энергетического баланса. В такую сеть можно воткнуть конденсатор. Кто первый стал описывать энергию плоского конденсатора? Г. Гельмгольц.

Джеймс Джоуль (1818–1889)

Главная его заслуга — экспериментальное доказательство взаимных превращений и баланса энергии. Все началось с 30-х годов, он обнаружил закон (позже названный Джоуля — Ленца): если у нас имеет место электрическая цепь, то мы можем конкретно видеть, что тепло пропорционально протекающему току во второй степени выделяется вот на сопротивлении. Не просто нагревается резистор, но и выделяется определённое тепло. Здесь можно было провести конкретное измерение. Закон Ома скорее экспериментальный. А вот на счёт закона Джоуля — Ленца всё кажется понятным. Это для нас энергетическая интерпретация естественна. А тогда было неизвестно, что есть тепло и откуда оно берётся. Затем баланс энергии в газовых процессах. В отличие от Ю. Майера Дж. Джоуль проводил эксперименты, наблюдал процессы Ж. Гей-Люссака.

Возникновение термодинамики. У. Томпсон и Р. Клаузиус. Необратимость физических явлений

Завершение эпохи утверждения закона сохранения энергии. Возвращаемся к тепловым двигателям. Из практики идет развитие. У. Томпсон, в последствии лорд Кельвин, обратил внимание на физику тепловых явлений в эпоху смерти теплорода. Обратил внимание на особые свойства тепла. Таких свойств нет у других величин. Эти свойства проявили себя в эффективности тепловых машин. Николя Леонар Садик Карно работал с КПД и идеальным циклом паровой машины. С. Карно действовал в

эпоху теплорода. Сравнивал мельницу с тепловой машиной. Эффективность мельницы определяется высотой, с которой падает вода. проводя аналогию, он говорил, что КПД зависит от теплорода. Он говорил, как сконструировать идеальную машину, но только на бумаге. У. Томпсон увидел в этих идеях концепцию, которая поможет дополнить другие законы. Возникновение термодинамики. Идея циклов. Введение шкалы температур. До него было эмпирическим параметром. Но тепловое расширение неравномерное и с помощью теории Карно можно было ввести абсолютную шкалу. Идеи возникновения энтропии. Обратимые и необратимые процессы. На ранней стадии догадался до того, что особые свойства теплоты затрудняют создание модели теплоты. Непонятно как её объяснять с помощью механики. Механические модели обратимы, а термодинамика необратима. Термодинамика противоречит механике.

Лекция 9. История формирования термодинамики и статистической физики

Утверждение превращения разных видов энергии, измерило теорию происхождения тепла. Дальше возникновение статистической физики и статистической механики.

Возникновение молекулярно-кинетической теории в середине XIX века

Молекулярно-кинетическая теория. Существенную роль начинают играть разреженные газы. В начале XIX века выяснилось, что есть сравнительно простые законы Клапейрона про идеальные газы. Тут попытались разобраться с тепловыми свойствами. Уотерстон сделал доклад в 1845, но он не был опубликован. Самая главная, центральная работа, которая сыграла роль спускового механизма, работа Августа Кренига: объяснение тепловых явлений, связанным с движением частиц, восприятие тепла как скрытое движение. Параллельно молекулярно-кинетическим моделированием занимался Р. Клаузиус. Он пытался объяснить начала термодинамики, связать с моделью теплового движения. Он обнаружил ошибку в представлении Августа Кренига. Частица, которая сталкивается со стенкой передает $2mc$, а не $1mc$. На это обратил внимание Р. Клаузиус и решил опубликовать свои труды. Ещё была идея о том, что нужно как-то применить здесь теорию вероятностей.

В результате деятельности И. Гаусса возникла теория вероятности непрерывно распределённых величин. Не очень было понятно, о чем идет здесь речь. Р. Клаузиус проводил аналогию, он не использовал теорию вероятности для построения новой молекулярно-кинетической теории прямо. Он проводил аналогию, говоря о разделе больших чисел в социологии. Р. Клаузиус считал, что есть средние значения, и что нужно заменить неизвестные значения на средние. При большом количестве частиц будет вполне нормально. Дискуссия с Христофором Хенриком Дидериком Бёйс-Баллотом. Он обратил внимание, что если взять азот, то скорость будет 402 м/с, при этом дым видимый глазом распространяется медленно.

Р. Клаузиус модифицировал теорию, введя длину свободного пробега. Постепенно подходили к идее о том, что энергия вращательного движения (как считал М. В. Ломоносов) ближе к поступательной. Реальные газы — неидеальные системы. Р. Клаузиус использовал идеи о аффинитном квазипериодическом движении. Тогда эффективно использовать теорему вириала, она возникла ещё раньше. Так кинетическая энергия связана со среднепотенциальной.

Исследования Дж. Максвелла по МКТ в 60-е годы XIX века. Проникновение теории вероятности в физику

С Дж. Максвеллом связано 2 десятилетия развития МКТ. Создает полевую электродинамику, основатель статистической физики. Степень проникновения ока-

зывается более существенной. Одна работа — доклад «Пояснение о динамической теории газов», вторая работа по-сути монография. Метод вероятностного описания непрерывных величин оказался очень удобным для построения теории ошибок. Дж. Максвелл изучил теорию ошибок и пришел к выводу, что нужно вводить формулу распределения. Используется идея независимых случайных событий, тогда совместная вероятность равна произведению парциальных вероятностей. Распределение Дж. Максвелла выводится из того, что случайные величины это декартовы компоненты скорости частицы. Получается функциональное уравнение. Это обоснование приводил сам Дж. Максвелл, но обоснование неправильное, хоть оно и повторяется во всех учебниках. Распределение Дж. Максвелла работает в релятивистской динамике плазмы или заряженных частиц. Там будет известна экспонента, там есть корень и уже не получится произведение. Вывод оказался совершенно неправильный. При этом вывод, который дал Дж. Максвелл через 6 лет, требует подхода теоретической физики. Там вводится концепция динамического хаоса, не для отдельной частицы, а для различных частиц. Если мы берем различные частицы, то мы можем взять двухчастичную функцию распределения. Скорости каждой независимые события. Дальше рассматривается столкновения. И считается, что столкновения не должны менять эту вероятность. Баланс обеспечивает стационарность распределения. Л. Больцман указал, что это доказательство только достаточности, но не необходимости. Как происходит установление? Непонятно. Вывод ничем не отличается от современной концепции.

Есть ещё одно существенное различие. Как устроена система взаимодействующих частиц. Детально не рассматривалось. Во второй работе последовательный анализ взаимодействия частиц. Частицы имеющие малый размер, которые взаимодействуют на больших расстояниях силами притяжения и эти силы падают по определённому закону. Это произвело большое впечатление на Л. Больцмана. Дж. Максвелл взял в формулу -5 степень. Там возникали неприятные интегралы и единственный случай, когда система упрощается, это если использовать 5 степень. Дж. Максвелл считал, что различия, если взять 5 или 6 степень будут не очень большие, зато оно реально для подсчета. Он смог продвинуться в расчете переноса. Методом последовательного переноса. Есть практически равновесное состояние и рассмотрение переноса. Ему удастся получить почти все известные формулы. Как выводится? Есть некоторый компромисс между длиной свободного пробега и молекулярно-кинетической системы. Зависимость теплопроводности от давления. В результате было выяснено, что коэффициенты зависят от температуры, но не зависят от давления. МКТ обрела своеобразный статус. Очень многие результаты были получены оперативно, но в основном они позволяли объяснить известные законы.

В 60-е годы начались важные дискуссии Дж. Максвелла и У. Томпсона (лорд Кельвин). Кельвин до конца жизни критически относился к теории поля. Имели место споры, которые продолжались до 70-х годов. В том, как устроено механическое обоснование термодинамики, МКТ. У. Томпсон видел одно препятствие — необратимость. Любая конструкция — система без трения, гамильтоновская система. Они обратимы во времени. Механическое движение обратимо, но термодинамика необратима. Еще одна проблема. У У. Томпсона были свои идеи. Атом он тогда

рассматривал как сложную конструкцию, считал его вихрем. Атом — вихревая особенность. При этом в конце получилась теорема о распределении по степеням свободы. Но вихревая модель предполагает континуум.

Людвиг Эдуард Больцман (1844–1906). Создание статистической физики

Ранний период деятельности Л. Больцмана. В дипломной работе содержится гениальное открытие. Адиабатические инварианты. До этого ничего такого в механике не было. Почти все, что изучается в статистической физике — все сформулировано у Л. Больцмана. Но есть нюансы. Л. Больцман познакомился с теорией Дж. Максвелла о динамических газах, решил обобщить и сделать работу более фундаментальной. Л. Больцман вводит важное понятие — многоатомные молекулы. Не очень было понятно, какие молекулы, какие свойства у них будут. Брались просто декартовы координаты и потенциальные силы. Молекулы обладали определённой энергией. Если молекулы движутся без столкновения, то мы можем ввести некое соотношение стационарности. Для описания использовал что-то похожее на уравнение Лиувилля. При столкновении происходит обмен интегралами движения, моментами импульса и многоатомные молекулы можно поставить на места молекул Дж. Максвелла. Рассматривал разные постановки задач.

Изолированная система. Если использовать равновероятность значения энергии, то можно вывести распределение Дж. Максвелла. Сейчас это называется микроканоническим распределением. Как описать твёрдые тела и жидкости? Он смог ответить на вопрос, как описывать равновесие твёрдых тел. Доказал закон Дюлонга — Пти. Удалось вывести из кинетической теории. Идея ансамбля. Многоатомные молекулы, которые редко взаимодействуют друг с другом. Средние значения рассматривались без теории вероятностей. Просто среднее по времени пребывания. $6N$ -мерное пространство он уже начал использовать.

В ранних работах был «шаг назад» относительно Дж. Максвелла. Воспринимал статистику как приближенный метод расчета, не более, поэтому, особо не придавал значения и не использовал в своих работах.

Одним из важных результатов было открытие больцмановского фактора. Число Авогадро было неизвестно и не удавалось точно определить количество частиц в системе. Только в 1900 году было открыто число Авогадро (или постоянная Больцмана). У Л. Больцмана получалась еще одна формула — как устроена система, находящаяся в термостате.

Появляется идея фазовых средних. Вплоть до 1873 года метод функции распределения это приближенная теория механического решения.

Релаксация к состоянию равновесия. Согласование с МКТ и вывод второго начала термодинамики

Вывод кинетического уравнения Больцмана. Основа возникновения физической кинетики. Был момент на который Дж. Максвелл совсем не ответил, и функция распределения тут актуальна. Система стремится к равновесному распределению. Но как во времени описать? Решил, что функция распределения актуальна и должна быть функцией времени. Должна быть 7-мерная. В равновесии шестимерная. С правой стороны использован баланс, представленный Дж. Максвеллом, для анализа столкновений. Л. Больцман сам уравнение решить не смог. Смог только доказать H -теорему. Функцию в наше время связывают с энтропией.

Парадокс Лошмидта. Споры с Л. Больцманом. Если в системе заменить скорости на обратные, то система должна эволюционировать по некой траектории в обратном направлении. Дальше Л. Больцман свою систему изменил, перешел на позиции Дж. Максвелла и принял важность теории вероятности. Есть продолжение метода Томпсона. У. Томпсон рассматривал частные взаимоотношения. Рассматривает макро- и микросостояния. Через сколько микросостояний можно сформировать разные макросостояния. Он считал что системы имеют неустойчивую динамику. Малейшие внешние воздействия непредсказуемы. Если посмотреть современное состояние проблемы, то оно не далеко ушло от того периода. Л. Больцман вводит в фазовом пространстве рассмотрение сложных молекул, вводит понятие вероятностных состояний. Фиксированная полная энергия и количество частиц. эволюция системы происходит от менее вероятного к более вероятному в этом и есть суть термодинамики.

Ситуация конца 70-ых–90-ых гг. XIX века, кризисное развитие МКТ

У теории есть масса проблем. Ограниченное количество удачных предсказаний. Накопилось большое количество внутренних противоречий. Парадокс Лошмидта. Парадокс Пуанкаре. Любая система является квазипериодичной. То есть возвращается в бесконечно малый фазовый объем вокруг конкретной точки. Эрнст Цермело воспользовался этим. Если система приходит в равновесие, в точку, то с точки зрения теории она должна выйти из равновесия. Поскольку число частиц было непонятно, то они переоценили уменьшение флуктуаций за счет большого числа частиц. Считалось, что рассчитать ничего невозможно, и никто не пытался. В те же годы имела философская методологическая критика. Э. Мах. Говорил о том, что философия нужна чтобы убирать из физики лишнее. Вообще не должно быть никаких вещей, которые невозможно проверить экспериментально. Теория Максвелла — Больцмана была недостаточно правильной в этой парадигме.

Джозайя Уиллард Гиббс ушёл от конкретных моделей устройства тел (газа, жидкости). У него есть абстрактный гамельтоновский подход. Это было стимулировано как раз критикой. Было абстрактное гамильтоновское описание. Вторая

особенность уводила чуть назад — здесь не было ничего про релаксацию.

Дальнейшее развитие статистической физики

Появляется использование метода Больцмана. М. Планк во втором труде в обосновании теории использует метод Больцмана. Получены константы в 1900 году. В 1904 году выходит статья Мариана Смолуховского «О нерегулярности в распределении молекул газа». Сначала не очень привлекла внимание, хотя автор обратил внимание на возможность неравномерного расположения атомов. А. Эйнштейн попытался объяснить броуновское движение с помощью теории Максвелла — Больцмана. Получился ряд результатов — формулы А. Эйнштейна.

Как изменяется средний квадрат координаты броуновской частицы с течением времени. В 1908-1909 году Ж. Перрен провел опыты, подтверждающие выводы А. Эйнштейна. Парадоксы до сих пор остались неразрешимы, но молекулы и атомы стали реальными и от теории уже нельзя было просто отказаться. Есть один момент. Теория электронной проводимости Друде — Лоренца. Г. Лоренц рассмотрел диффузию легкого газа в тяжелом, но использовал не метод Клаузиуса, и впервые смог решить уравнение Больцмана.

Дальнейшее развитие физической кинетики

Решение уравнения Больцмана. Вторая половина 30-х годов XX века. Метод Гилберта — Чемпена — Энскога приближенного решения уравнения Больцмана, очень сложный метод. 5-моментное приближение в вязкой гидродинамике. «Локальное распределение Дж. Максвелла», оказалось что Л. Больцман был неправ, вводя стохастику. Образуется локальный максимум а дальше уравнение Навье — Стокса.

Принципиально новое кинетическое уравнение для систем с дальнедействием — уравнение Власова в статье 1938 года. Николай Николаевич Боголюбов в 1945 году — иерархия времен релаксации и стадий эволюции макросистем. Кинетическая, гидродинамическая.

Лекция 10. Возникновение специальной теории относительности

Перед войной много внимания уделяли СТО. Сейчас эти акценты уравнились.

Деятельность Гендрика Антона Лоренца (1853-1928 гг). Возникновение электронной теории

Известная позиция, рассматривалась как этап развития СТО. В первую очередь, Г. Лоренц первый физический теоретик. Фон для деятельности Г. Лоренца — опыт Г. Роуланда. Он обратил внимание что конвективный ток, переносимый со скоростью, неотличим от тока проводимости. Подтверждение положений электродинамики Вебера. Сильнейшим образом повлиял на Г. Лоренца. Современное изложение электродинамики состоит из 2х частей. Вакуумная и сплошной среды. Введение свободных или связанных зарядов, макро- и микроскопического поля. По-сути это наследие ключевых идей Г. Лоренца. Он воспользовался уравнением Дж. Максвелла, но существенно его изменил. Там на равных правах были фундаментальные и материальные уравнения. Сейчас так не делается. Параллельно Дж. Максвеллу шло развитие атомизма. Р. Клаузиус был связкой между атомизмом и Дж. Максвеллом. но у него были векторные и скалярные потенциалы. Главная заслуга Г. Лоренца в том, что он соединил две теории. Сохраняя структуру предположил, что взаимодействие происходит за счет поля. До Г. Лоренца так никто не делал.

Это эпоха и существенного развития статистической физики Максвелла — Больцмана. Г. Лоренц некоторые моменты поправляет. Сила действующая на дискретный заряд — сила Лоренца. У Дж. Максвелла уже была теория преобразования полей. Нам не важно, движется магнит к контуру или контур относительно неподвижного магнита. Идея динамики частиц. Идея согласованного магнитного поля. Возникают дискретные частицы, с другой стороны образ континуального поля. Еще одно различие между Дж. Максвеллом и Г. Лоренцом. У Дж. Максвелла нет излучения электромагнитных волн, получается линейная система. Г. Лоренц при анализе конструкции частица–поле приводит к тому, что возникает нелинейная динамика.

Сфера применения ионной теории Лоренца

Молекулярная оптика. Первый результат. Формула Лорентц — Лоренца. Связь диэлектрической проницаемости вещества и его плотности. Активно развивавшаяся оптика после Т. Юнга и О. Френеля. Эта оптика предполагала эфир как упругую среду и там возникла дискретность. Был такой результат, что если линейная упругая среда для изотропной системы, то непонятно куда деть продольную волну, но еще и дисперсии нет, а она должна быть. Огюстен Луи Коши решил,

что чтобы ввести дисперсию нужно ввести дискретные образы. Поэтому атомы и молекулы уже присутствовали в оптике.

Магнитный эффект Керра. Хорошо объяснялся теорией Лоренца. Теория в этот ранний период не называлась электронной, потому что сам электрон бы открыт позже. Электронная теория фигурирует, но называлась ионной теорией. Но потом выяснилось что есть один особый ион, который сильно отличается от остальных. Позже это стал электрон.

Эффект Зеемана был тоже предсказан в теории Лоренца. Он показал, что есть атом или молекула, которые колеблются в постоянном магнитном поле. Что вдоль направления колебаний будет переизлучаться с несмещённой частотой излучение, а в поперечном направлении будут получаться две компоненты. Питер Зееман целенаправленно это искал и нашел в натрии. Интересно, что чаще всего встречается аномальный эффект Зеемана. Обычно получается что-то более сложное, а не трёхкомпонентная система. Но П. Зееман довольно удачно нашел именно нужный материал, где образуется 2 компоненты. Он смог его объяснить. А отсюда получается отношение заряда к массе. Это было сделано за год до открытия электрона. Предсказание, что частица должна иметь такое отношение заряда к массе поместило электрон как оптическую частицу внутрь молекулы и атома.

Электродинамика движущихся тел

Важная тема для Г. Лоренца. Это проблема возникла еще у Дж. Максвелла. Если в электродинамике Вебера все описывается относительным движением частиц, сохранялась симметрия, как и с теорией И. Ньютона. В теории Максвелла получалась несимметричная ситуация. Он ввел преобразование полей. Он догадался, что если будут эффекты, то это будет vc^2 .

Электронная теория проводимости металлов. Г. Лоренц следил за трудами Л. Больцмана, дискутировал с ним в переписке. В начале XX века еще не все были уверены в МКТ. В 1900 Друде продолжил линию Р. Клаузиуса. Р. Клаузиус сделал свои исследования на основании идеи длины свободного пробега. Для диффузии и вязкости это оказывается довольно близко. Друде использовал упрощённый подход. У Г. Лоренца результаты совсем другие. Речь шла о серьёзном теоретическом подходе. Он пытался решать уравнение Больцмана. Первый, кто смог решить кинетическое уравнение Больцмана был Г. Лоренц. Он получил приближенное решение через исследование легкого газа в тяжелом. Решение Г. Лоренца очень ценное. В том числе это было движение в сторону создание ядерного оружия.

Открытие электрона (1897)

Принципиально оказалось открытие вакуумного насоса. Сразу стали изучать прохождение тока в стеклянных сосудах без воздуха. Оказалось, что ток можно пропускать. Увидели некоторое свечение вокруг катода. Катодные токи. Уильям Крукс считал, что это свечение остаточного газа. Другие считали, что остаточный газ светиться не будет. Привлекли влияние внешних полей на положение пятен.

Г. Герц — отклонение лучей под действием магнитного поля. В XIX веке исследования Ж. Перрена показали, что лучи связаны с накоплением отрицательного заряда. Дж. Томпсон обратился к изучению катодных лучей. Большая скорость, он сразу стал считать, что там идет распространение частиц. Оказалось что можно довольно точно предсказать положение катодного пятна. Оттуда он получил соотношение заряда к массе, как в опытах Зеемана. Отношение оказалось таким же. Исследование электролиза. Была определённая связь — константа Фарадея. Была и чисто теоретическая проблема. В Англии никто не сомневался в теории Максвелла, но появились проблемы, когда стали обсуждать проблему движущегося заряда. Дж. Томпсон обратил внимание, что если мы будем говорить о теории поля, то энергия поля будет определяться электростатической частью, а при движении будет возникать магнитное поле. Возникла идея электромагнитной массы. Эта тема была продолжена, то если решать более последовательно, то там выражение будет четное, но не квадратичное, а более сложной структуры. Возникает связь массы от скорости. Эта идея противоречила ньютоновской механике.

Электродинамика движущихся тел

Явное движение. Движение источника, приёмника, эффект Доплера. Было еще одно влияние. Влияние движения массивной среды. Это было предсказано О. Френелем в рамках концепции частичного влечения света. Эффект Физо смог объяснить только введением местного времени. В идеологии Г. Лоренца это имеется ввиду, что нужно ввести поправку на масштаб времени. Если мы возьмем уравнения Максвелла, то мы можем зафиксировать абсолютное движение, когда все движется с некоторой скоростью. Что нет относительного движения, а есть движение относительно выделенной системы. Подход Г. Лоренца был другим. Г. Лоренц был сторонником концепции эфира, но лишь в той степени, что настороженно относился к идеям Дж. Максвелла, к его уравнениям, но при этом следовал подходу Дж. Максвелла. Система не симметричная по отношению к движению относительно нее. Это было очевидно и Г. Лоренцу. Г. Герц действуя в тоже время предложил другую идею. Идея введения вместо частной производной по времени, субстанциональную производную. Но здесь мы должны знать, что у нас есть эфир и него есть некоторая скорость, которую надо как-то зафиксировать. У Г. Лоренца было проще, просто записывались уравнения Максвелла, а потом все величины преобразовывались. В это время оказалось, что оптические исследования достигли достаточной точности, чтобы можно было проверить поправки с абсолютным движением системы отсчёта. Этим занялся Майкельсон. Г. Лоренц критиковал его работы, теоретическую часть. В процессе выяснилось, никакого абсолютного движения не бывает. Тогда в конце концов все пришли к выводу, что эффекта предсказанного Дж. Максвеллом про абсолютное движение не наблюдается.

Анри Пуанкаре и электронная теория Лоренца

Нашел логическую дыру в системе Г. Лоренца. Что есть отдельно эффекты связанные с движением системы отсчёта, но объяснения для каждого порядка разные. приходится вводить местное время, продольное сокращение. С точки зрения логики это не хорошо, нужно все решить с точки зрения единой позиции. У него был принцип относительности для теории Лоренца. В 1904 году вводит в контекст электронной теории принцип относительности как одинаковость законов природы для неподвижного и движущегося наблюдателя. также форм-инвариантность законов, необходимость пересмотра законов динамики частиц. Никакая скорость частиц не превысит скорость света. В качестве основы он берет систему Максвелла — Лоренца. Полевые уравнения были взяты в готовой форме, а динамику электрона он подверг пересмотру и соединил с принципом относительности. Довольно близко к идеям Эйнштейна. Он сразу ввел это в основу и использовал для конструктивного формирования изменений в теории. Как фундаментальный математик он сделал важный вывод: чтобы симметрия имела место быть, то нужно, чтобы была группа преобразований. Он сразу показал и какие инварианты могут быть. Было уравнение динамики электрона. Через несколько месяцев появляется статья А. Эйнштейна.

Альберт Эйнштейн (1879-1955 гг.) и возникновение СТО

Совершенно другой способ исследования. А. Эйнштейн был во многом самоучкой, что скорее всего не читал работ Г. Лоренца и А. Пуанкаре. В 1905 году было множество работ. Не только о СТО, работа по броуновскому движению, работа по фотоэффекту. Все исследования шли параллельно. А. Пуанкаре подходил со стороны математики, он видел неточности в системе Лоренца и их собирался исправить. А А. Эйнштейн подходил от позиции физики в целом. Если имеют квантовые свойства света, то применимость уравнений Максвелла имеют ограниченную применимость. Он совершил изменение подхода. Если оставить минимум от теории Максвелла, который согласовывался с квантовыми свойствами света. Постулат о том, что скорость света в пустоте не зависит от скорости света источника или приёмника. Это позволило сосредоточиться не на всей системе электродинамике, а на фундаментальных пространственно-временных соотношениях, пересмотреть геометрию пространства и времени. Метод измерения времени. Относительность времени, одновременности, длины. Все пространственно-временные соотношения были в первой части работы. Вторая часть была электромагнитная. Уравнение динамики электрона. Получен поперечный эффект Доплера. Вспоминая квантовые свойства света, формула энергии кванта света есть соотношение частоты и энергии. А. Эйнштейн показал, что энергия преобразуется также как частота.

Механика СТО

Есть такая позиция, что была механика Ньютона, а стала СТО. Если мы говорим о механике, как о теории взаимодействия тел (с конечным числом степеней

свободы) то у нас до сих пор механика Ньютона и другой теории нет. М. Планк вдохновился работами А. Эйнштейна, дополнил результатами А. Пуанкаре. Уже не очень понятно, какая сила действует. Для частицы можно записать функцию Лагранжа и Гамильтона.

1909 году Гилберт Ньютон Льюис и Ричард Толмен анализируют соударение релятивистских частиц в духе Х. Гюйгенса — из преобразования Лоренца. Симметрия соударения. Формирование новой теории соударения.

Релятивистская связь массы и энергии. А. Пуанкаре показал, что важнейшим нюансом является наличие тензора энергии импульса у электромагнитного поля. Дальше знаменитая статья А. Эйнштейна. М. Планк вернулся к тому, что надо считать и у вещества и массивных тел есть тензор энергии импульса.

Герман Минковский в 1908 году начал разобратся и показал, что если есть различные геометрии и если физическая гипотеза основана на геометрической, то есть разные инварианты. Г. Минковский впервые показал псевдоевклидову геометрию четырехмерного мира.

Признание СТО

В рамках электромагнитных опытах невозможно отличить СТО от теории Лоренца. Принципиальным моментом является открытие ядерных сил. Мезоны распадаются и время их жизни меняется от движения как предсказывает теория А. Эйнштейна.

Лекция 11. Возникновение квантовой теории

Когда мы говорили о создании СТО, важную роль сыграли не опыты по движению частиц, а внутренние противоречия в системе частица-поле. Иногда также излагают историю квантовой теории. Внутренние противоречия между классической механикой и теорией равновесного теплового излучения. Но это логическое противоречие сыграло второстепенную роль.

Сложности классической физики на рубеже XIX века

Объяснение уменьшения удельной теплоёмкости твёрдых тел при $T \rightarrow 0$.

Значения теплоёмкостей газов и объяснение «невключения» некоторых внутренних степеней свободы, то же при упругих столкновениях.

Проблема непрерывного спектра равновесного излучения черного тела.

Все начинается с закона Кирхгофа. Равновесное излучение черного тела. Можем использовать идею, что тело поглощает все, что в него падает. Из этого получалось вывести интеграл (закон Стефана — Больцмана). Он выводится теоретически.

Йозеф Стефан этот закон опубликовал. Внимательное изучение работы показало, что он пришел к этому закону случайно. Л. Больцман обратил внимание на работу Й. Стефана и опубликовал теоретический анализ. Закон утвердился. Общую проблему он не решил. Как выглядит функция оставалось непонятным.

Смещение Вина. В 1894 году без статистики из термодинамических данных и формулы Доплера высказал идею о том, что есть однозначная связь длины волны излучения молекулы и энергии этой молекулы. Интересно, что существенную роль сыграли не внутренние противоречия, а возможность создания черного тела. Что модель черного тела была не такой абстрактной, как модель абсолютно гладкого тела. Черное тело можно реализовать в реальном мире. Второе, экспериментально получается создать болометр, который позволяет измерять излучение в определённой частоте. Третий момент. В Берлине образовался научный центр, берлинский научный физико-технический институт, который объединил усилия разных ученых. Фридрих Пашен экспериментально подтвердил закон Вина. С другой стороны, связь скорости и длины волны был не понятна. Обоснование было очень зыбким.

М. Планк: первый подход к проблеме

Первая часть. Получение необходимой формулы. Формула не зависит от вещества, поэтому он взял систему гармонических осцилляторов. Формула состояла из двух частей. Слева функция, которую стали изучать после Густава Кирхгофа, а справа произведение двух величин средняя энергия осциллятора в тепловом равновесии и электродинамического фактора. Сама эта формула раньше появиться не могла и была основана на продвинутом для того времени моменте: дипольное излучение и взаимодействие с осциллятором. Возникает сила лучистого трения. Сам вывод

непростой. Основывается на теории Герца. Когда говорят о классической теории излучения, говорят про Г. Герца. В статфизике была идея молекулярного хаоса. Здесь М. Планк считал, что нужно действовать аналогично, что получается естественная поляризация. Сейчас этот термин используется по-другому классическая, в смысле не квантовая. На основе их результата была видна некоторая неточность. Сейчас это называется ультрафиолетовая катастрофа — нельзя взять интеграл по всем частотам. Но М. Планк и его коллеги не собирались брать такой интеграл. Это более поздний вывод. Дискуссии Дж. Максвелла и Томпсона. У Томпсона атом был вихрем и имеет континуум степеней свободы. М. Планк основывался не на статфизике.

В 1900 году обнаружены отклонения от формулы Вина в области длинных волн. Релей опубликовал работу, в которой рассматривал систему стоячих волн. Постоянная Больцмана появляется из комплекса работ М. Планка. Была получена экспериментальная формула Рубенса и Курльбаума.

Осень-начало зимы 1900 года. М. Планк видит два варианта, когда эксперименты подтверждают определённые формулы. Высокочастотный предел — это формула Вина и низкочастотный предел — формула Рубенса и Курльбаума. Получается интерполяция М. Планка. Он больше имеет дело с энтропией системы. Обоснованного вывода нет, но есть интерполяция. Две интерполяционные константы, которые помогли получить формулу, которая подтвердилась в широком плане.

Вторая работа М. Планка была о том, что М. Планк попытался теоретически обосновать работающую формулу. Сам метод М. Планка постоянно привлекал к себе внимание. Выдающийся результат — открытие большого числа констант, в том числе числа Авогадро. Постоянная Больцмана была введена М. Планком. Но есть масса отличий от метода Больцмана. До 1905 года открытие М. Планка недооценивалось. М. Планк вводит распределение осциллятора. Распределение надо вводить в фазовом пространстве. А у фотона другое фазовое пространство. М. Планк берет просто порцию энергии. Делает довольно произвольные выводы. Если у Л. Больцмана в результате методов получается некоторое распределение без ячеек, то у М. Планка размер порции энергии входит в формулу. Вывод константы h . Это некая величина, которая называется действие. Оно становится дискретным. Сам М. Планк увидел успешность своей работы, при этом он первоначально считал, что вся дискретность связана с тем, что открыто новое явление. И он видел свой анализ неполноценным. Что радикального передела статфизики и механики не нужно, нужно внимательнее изучить само явление. Прошло 10 лет прежде чем взгляд на эту работу изменился. В 1910 году Г. Лоренц смог доказать что никакими классическими способами нельзя объяснить теорию Планка.

Теория фотоэффекта, идея кванта света (фотона)

А. Эйнштейн получил нобелевскую премию за теорию фотона. 1905 г работа А. Эйнштейна «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света». А. Эйнштейн в отличие от А. Пуанкаре не использует уравнения Максвелла в своей работе. Он видел, что есть некоторая пустота в выводах Дж. Максвелла. У него возникает идея фотона, которая не укладывается в систему

Дж. Максвелла и что это не значит, что электромагнитной теории нужен совсем перевод.

А. Эйнштейн выводит формулу Вина. Предлагает забыть о волновых свойствах света, просто взять газ и по теории Максвелла — Больцмана можно посчитать распределение энергии. Получается формула Вина. Если полость заполнена равномерным излучением в соответствии с законом Вина, то это излучение в смысле термодинамики ведет себя как газ из частиц с энергией $h\nu$.

Вторая часть — теория фотоэффекта. Красная граница в спектре объясняется что имеет место дискретность возможности излучения в однофотонном пределе. Трудности в том, как объяснить интерференцию при разностях хода до $10^6\lambda$. В 1903 году Томпсон указал на особенность ионизации рентгеновскими лучами. Игольчатая структура распределения энергии.

Фотоэффект:

Открыт Г. Герцем в 1886 году (он обнаружил, что УФ увеличивает длину искры). УФ оказывается более эффективным в ионизации почему-то. Но Г. Герц не исследовал детально эти свойства.

Велика роль Александра Григорьевича Столетова. Он исследовал фотоэффект. Показал красную границу, создал фотоэлемент. Открыл законы фотоэффекта.

В 1907 году открыли электрон в катодных лучах. Оказалось, что в фотоэлементе, фототок — т. е. ток через пустоту. Он пропорционален интенсивности света. Выяснили, что это электроны.

Фотоэффект может быть многофотонным, тогда будет другая формула. Здесь же утверждается, что большая часть будет однофотонной. В 1909 году Йоханнес Штарк высказал идею, что с точки зрения СТО мы допускаем, что электроны не могут обладать только энергией, что должен быть и импульс. Безмассовая частица с известным импульсом. Намного позже Артур Холли Комптон предложил на отдельных заряженных частицах могут рассеиваться фотоны и что возникает известный сдвиг частоты или волны. Если мы просто говорим о системе заряженных частиц, которая в общем своем нейтральна и у нас на этот сгусток падает электромагнитное излучение. На самом деле никакого смещения по частоте не должно быть. Но это не правильно. Если мы говорим о плазме там квантовые эффекты не существенны, но эффект Комптона есть. Это не только история фотоэффекта, но и история утверждения идей А. Эйнштейна. Утверждения света как частицы.

Идея корпускулярно-волнового дуализма света

Все началось с дуализма именно для излучения. В 1909 году А. Эйнштейн опубликовал работу «К современному состоянию проблемы излучения», там он снова выводит постоянную Планка. На основе формулы Планка рассчитал флуктуацию средней энергии теплового излучения в единице объема при заданной температуре в частном диапазоне. В состоянии термодинамического равновесия. Результат можно представить в виде суммы двух формул. Причем в этом выражении максвелловская теория дает второе слагаемое (интерференция парциальных волн), а первое можно

получить из идеи квантов света, подчиняющихся классической статистике. А. Эйнштейн просто хотел еще раз показать несовместимость волновой теории света и формулы Планка, но через некоторое время из этого сформировалась концепция корпускулярно–волнового дуализма для света. Формулирует идею о двойной природе света. Если брать низкие частоты, то там никаких свойств частиц особо не увидишь, а для длинных вол наоборот.

Применение идеи квантов — новая механика

Краковский физик Натансон в 1911 года обратил внимание на метод подсчета комплексов и гипотезу равновероятности. Есть два подхода и получаются два результата. Потом к этому вернулись уже значительно позже.

Сольвеевский конгресс ноябрь 1911 года

Конгресс с участием самых выдающихся физиков того времени. Основные дискуссии были посвящены проблеме излучения твердого тела, и в центре доклад М. Планка: модификация классической статистики Максвелла — Больцмана — Гиббса для осциллятора. К этому моменту М. Планк сменил свою позицию. Он высказал идею, об отказе от принципа универсальной справедливости классической механики. Предложил введение квантовых принципов свести к дискретным ячейкам. Здесь возникают ячейки по размерности h . Площадь в фазовом пространстве между n и $n + 1$ уровнем энергии должна быть не произвольная, а равная h . Раньше фазовое пространство было любое. Теперь минимальный размер должен быть кратен h . Появляется принцип квантования. Теперь можно проквантовать атом. Было две гипотезы атома до того момента. Если проквантовать модель пудинга с изюмом, получается правильный спектр водорода. Здесь существенна реальная история физики. Что открытие ядра из спектральных свойств получить нельзя. М. Планк вывел среднюю энергию интеграла.

Теплоемкость твердого тела

Две части. Первая часть была догадкой. В 1907 году А. Эйнштейн опубликовал работу «Теория излучения Планка и теория удельной теплоёмкости». Эксперимент показал, что все дело в квантовости, что нужно вводить систему планковских осцилляторов с одинаковой чистотой.

В 1912 года Петер Дебай, а позднее Макс Н. Борн и Теодор фон Карман предложили более последовательную теорию, объяснявшую поведение C при малых T . А Вальтер Герман Нернст продемонстрировал фундаментальность такого поведения. Они применили метод Больцмана.

Лекция 12. История возникновения квантовой механики

В начале XX века наблюдается кризис молекулярно–кинетической теории, при этом теория Максвелла — Больцмана из гипотетической становится устоявшейся и применяемой. Речь заходит не только о существовании атомов, но и об их строении. О спектрах начали говорить еще при черном теле, но только в XIX веке с появлением спектральных линий появилась идея идентификации вещества.

Развитие теории строения атома

Аргументы в пользу сложного строения атома:

- Химические аргументы (периодичность элементов)
- Радиоактивность
- Открытие электрона
- Исследование спектров
- Эффект Зеемана

В атомах тогда сильно сомневались, но в конце XIX века была открыта радиоактивность. В 1897 году открыт электрон. В результате исследования П. Зеемана оказывается, что электрон является той самой частицей, колебания которой и должны обеспечивать оптические спектры, и он должен входить в атом.

Иоганн Якоб Бальмер обратил внимание на закономерность строения спектральной линии водорода. Он установил количественные закономерности. Исследования активизировались, все больше закономерностей было установлено. Появляется принцип Ритца. Частоты имеют два индекса и их можно получать комбинируя в формуле спектральных термов. И формула дает частоты спектральных линий.

Атомные модели

У. Томсон исходил из существования атома, но считал их вихревыми. Только к XX веку модели дошли до привязки к эксперименту.

Планетарная модель была довольно очевидна, но требовала проверки. Ж. Перрен в 1901 году в популярной лекции изложил свою систему. Вокруг положительного центра вращается некоторое количество частиц. Только с заменой гравитационных сил кулоновскими. Вильгельм Вин забраковал эту модель. Он обратил внимание на то, что модель требует динамического равновесия, а оценки В. Вина показали, что за один оборот потеря энергии, которая связана с движением частицы, такова, что получалось что за один оборот частица должна была уже упасть на ядро. Параллельно возникает другая теория. Теория пудинга с изюмом. Заряд размазан на масштабе атома. Внутри положительного заряда находятся частицы — электроны. Количество было тоже непонятно. В электронной теории Лоренца важным моментом было наличие квазиупругой силы. В рамках модели Дж. Томсона эта система возникала из кулоновской силы.

Если бы продолжали просто спектральные исследования, то методом квантования получался практически правильный спектр водорода. У атома водорода вырожденный спектр который зависит только от главного квантового числа. Эффект Й. Штарка. Изменение спектральных линий в поле. Тут бы модель Дж. Томсона была уже не достаточно точна. В течение десятилетия с начала XX века до 1913 года — до момента открытия атома Н. Бора. Многие пытались изменять планетарную систему, пробовали делать кольца, как у Сатурна. Хантаро Нагаока предложил поперечные колебания. Пробовали наложить квантовые соображения. Отличием ранних моделей было то, что пробовали брать классические осцилляторы, поверх которых накладывали условия. Нильс Н. Бор поступил иначе. Проквантовали ротатор и смогли объяснить молекулярные спектры.

Модель атома Н. Бора (1913)

Сначала работал под руководством Дж. Томсона, но потом ушел к Эрнесту Резерфорду. Э. Резерфорд в 1912 году открыл атомное ядро. Рассеивание альфа-частиц. Сам Э. Резерфорд его объяснял тем, что все вещество сосредоточено в дискретных точках пространства и размер этих сосредоточений меньше атомов. Идея о том, что атом устроен как точка, вокруг которого движется что-то. Н. Бор начал решать проблему Вина — проблему устойчивости.

Возникает неоднозначность радиуса и периода обращения. Масса ядра большая и почти неподвижна. Электрон может вращаться с разной скоростью на разных удалениях. Возникла идея не объяснять, а использовать h , чтобы объяснить устойчивость. Идея в том, чтобы объяснить устойчивость системы с помощью постоянной h . Н. Бор сразу исходил из реальных спектров и принципа Ритца. Он публикует свои постулаты. Н. Бор в своей работе своеобразно комбинирует классическую механику и квантовую. Использует законы Кулона, но запрещает излучение. При этом переход при излучении он рассматривает как скачок, который не объясняется классической системой совсем. Момент в своей первой работе Н. Бор не квантовал. Появляется важный прообраз принципа соответствия и два его смысла. Один философский-методологический, второй — это некий эвристический принцип для создания новой теории которая должна соответствовать некоторым принципам. Частоты излучения появляются из второго постулата. Принцип соответствия выглядит так: он рассматривает захват электрона ядром на высоких орбитах с высокой энергией. Говорит, что частота обращения связана с частотой излучения. Потом возникло квантование момента, но позже. Идея стационарных уровней энергии. Были опыты Г. Герца с парами ртути. Оказалось, что есть некая дискретность расстояний, есть резонансные поглощения энергии.

Развитие правил квантования

После конгресса в 1911 году выяснилось что нужно вводить ячейки в квантовом пространстве. М. Планк формулирует ячейки. Как быть с системами с несколь-

кими степенями свободы? Нужно парами вводить интеграл движения и множество таких областей. Здесь не очень понятно, откуда эти пары брать.

Арнольд Зоммерфельд занялся квантованием. Оказалось, что известные квантовые интегралы здесь возникают. Есть целая история развития правил квантования. Адиабатический принцип и квантовые условия. Сейчас есть адиабатические инварианты. Л. Больцман в своей дипломной работе вводит эти понятия. Значение их до конца выяснилось только в XX веке. Задача про маятник переменной длины. Энергия не сохраняется, при этом сохраняется адиабатный инвариант. Во времена И. Ньютона такого не было. Л. Больцман ввел эти величины, но тоже такое не решал. Развитие классической механики было стимулировано квантовой механикой. А. Эйнштейн и Г. Лоренц этот термин не применяли, но к этому обратился ученик Г. Лоренца, Эренфест. Он показал этот адиабатический инвариант. Он пошел дальше, показав что правило квантования это использование адиабатических инвариантов. Смысл стал проявляться. Методом М. Планка было рассматривать не только гармонический осциллятор, но и любую другую систему с плавной деформацией кривой энергии. Когда маятник переходит в ротатор, то система теряет период и переход через сепаратрису ставит нас в тупик.

Принцип соответствия

Н. Бор вводит этот принцип. После работы А. Эйнштейна делает дополнения к своей теории. А. Эйнштейн вводит два понятия. Стимулированное излучение и стимулированное поглощение. Из комбинаций переходов можно получить постоянную Планка. Н. Бор подошел иначе. А. Эйнштейн считает что подход сугубо вероятностным, Н. Бор считает, что вероятностное это более фундаментальное явление и вообще невозможно уточнение. Он ввел спонтанное излучение. Дальше получается идея разложение коэффициентов Фурье, возникает правило Бора.

Создание матричной механики

В. Гейзенберг, последователь Н. Бора. Обращается к атомной физике, к вопросу о взаимодействии атомов, о молекулярной дисперсии. Здесь важен методологический– философский момент. Ему не нравилась структура. У Н. Бора эллиптические траектории, метод квантования, дипольные величины. Но при этом эти эллиптические траектории нигде наблюдать нельзя. Здесь мы видим еще один пример влияния философии на физику. Позитивистский дух отвечал менталитету физиков 19 века. Он был знаком с работами А. Эйнштейна. Ему понравилось как тот показал нетривиальность понятий, которые казались раньше банальными. Длина, одновременность. Все эти моменты произвели сильное впечатление, и он попытался распространить это на теорию атома. Что мы не можем никак наблюдать траектории электронов вокруг ядра и это невозможно проверить. Проверяется поляризация, частота излучений. Возникла идея сразу ввести идеи квантования. В. Гейзенберг не был знаком с теорией матриц. Он просто вводит наборы. Рассматривалась трёхмерная задача.

В случае матричного метода требовался сложный математический аппарат. Ему удалось сразу внедрить правила квантования. Он рассмотрел гармонический осциллятор. В. Гейзенберг взял агармонический осциллятор. Возникает нулевая энергия, система не может находиться без движения.

Н. Борн и Иордан. Проблема отыскания стационарных уровней энергии эквивалентна задаче диагонализации матрицы H . Речь идет о решении уравнения. В конце 1925 года Н. Борн и Норберт Винер (Винер — специалист по линейным операторам) записали матричную механику В. Гейзенберга на языке линейных операторов, такой подход позволял подступиться к задаче с непрерывным спектром, но они не догадались до этого.

В Англии П. Дирак показал, что ключевым моментом является новая алгебра, некоммутативная алгебра. Решать задачу Кеплера с помощью матричных методов очень сложно. П. Дирак и Паули решили задачу с атомом водорода.

Возникновение волновой механики

Предпосылки:

Распространение оптико–механической аналогии Гамильтона (1828–1837) на динамику электрона.

В электродинамику корпускулярно–волновой дуализм проник раньше, начиная с работы А. Эйнштейна 1909 года (дуализм фотонов). Экспериментаторы также констатировали корпускулярные свойства рентгеновских лучей. Но он объясняет далеко не все. Если взять формулу Планка целиком, то фотоны нужно рассматривать в флуктуации энергии фотона. Что они на низких частотах ведут себя как волны, а на высоких как частицы.

В электронах ситуация развивалась похоже. Выясняется, что классическую механику нельзя применять прямо. Гамильтон вводил оптико–механическую аналогию в своих работах. Как возникла волновая механика. Есть дифракция и интерференция электронов. Идеи волн электронов возникли не от дифракции и интерференции. Волновая идея возникает с работ Луи Де Бройля. Он рассмотрел идею о том, что возникают определённые частоты. Но согласно СТО в общем случае частота не является инвариантным числом. Комбинация четырехвекторная. Нужно ввести связанные пары. Де Бройль вводит идею волн вещества. Появляются пары энергия и частота, волновое число и импульс. Второй момент — конкретное применение. Объяснение правил квантования. Если рассматривать атом водорода то на орбите возникает стоячая волна. Стационарное состояние — стоячая волна. Только в 1927 году в Англии были открыты дифракция и интерференция на кристаллах. Сначала было предсказание, а потом уже открытие. 1926 год, Эрвин Шрёдингер на основании дальнейших развития Де Бройля смог записать уравнение Шрёдингера.



ФИЗИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА



teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ