

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

М.Р. Расовский, А.П. Русинов

ИСТОРИЯ ФИЗИКИ XX ВЕКА

Рекомендовано Ученым советом федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет» в качестве учебного пособия
для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального
образования по направлениям подготовки 011200 Физика и
011800 Радиофизика

Оренбург
2014

УДК 53(09) (075.8)

ББК 22.3гя73

Р 24

Рецензент – заведующий кафедрой радиофизики и электроники, доктор физико-математических наук, профессор М.Г. Кучеренко

Расовский, М.Р.

История физики XX века: учебное пособие / М.Р. Расовский, А.П. Русинов; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2014. – 182 с.
ISBN

Учебное пособие «История физики XX века» предназначено как для студентов, изучающих по программе бакалавриата курс истории физики, так и для будущих магистров, в программе обучения которых стоит курс «История и методология физики». Оно могло бы быть полезным и преподавателям соответствующих дисциплин. Учебное пособие предназначено для студентов направлений подготовки 011200 Физика и 011800 Радиофизика.

УДК 53(09) (075.8)

ББК 22.3гя73

ISBN

© Расовский М.Р., Русинов А.П., 2014
© ОГУ, 2014

Содержание

Введение	6
Глава 1 Научная революция конца XIX – начала XX веков	8
§ 1.1 Создание первых физических лабораторий и научных школ	8
§ 1.2 Три крупных экспериментальных открытия конца XIX века: рентгеновские лучи, радиоактивность, электрон	10
§ 1.3 Исследование строения атома. Модель атома Резерфорда – Бора	16
Глава 2 Развитие квантовых представлений и становление квантовой теории .	19
§ 2.1 Проблема теплового излучения и гипотеза о световых квантах	19
§ 2. 2 Дальнейшее развитие учения о квантах в работе А. Энштейна. Создание А. Энштейном и П. Дебаем квантовой теории теплоёмкости твёрдых тел	26
§ 2.3 Работы А. Энштейна по квантовой теории излучения	31
§ 2.4 Гипотеза де Бройля. Соотношение неопределенностей	36
§ 2. 5 Роль Э. Шредингера в создании квантовой механики. Уравнение Шредингера. Работы В. Гайзенберга и М. Борна	42
Глава 3 Создание теории относительности	46
§ 3. 1. Предпосылки к созданию СТО. Принцип относительности и электродинамика	46
§ 3.2 Создание СТО. Постулаты Энштейна	52
§ 3.3 Создание общей теории относительности (ОТО)	57
§ 3.4 Экспериментальная проверка общей теории относительности	61
Глава 4 Развитие физики атомного ядра и элементарных частиц	65
§ 4.1 Исследование свойств атомного ядра. Протонно-нейтронная модель. Ядерные силы	65
§ 4.2 Работы по облучению ядер урана нейтронами. Открытие деления ядер урана	70

§ 4.3 Первый ядерный реактор. Создание атомной бомбы.....	72
§ 4.4 Краткий обзор развития физики элементарных частиц	79
Глава 5 Физика твердого тела	87
§ 5.1 Зонная теория и электрические свойства кристаллов. Школа А. Ф. Иоффе	87
§ 5.2 Магнитные свойства твердых тел	89
§ 5.3 Полупроводники и микроэлектроника.....	93
§ 5.4 Эффект Мессбауэра.....	97
Глава 6 Оптика и квантовая электроника	101
§ 6.1 Новые оптические приборы и новые методы наблюдения.....	101
§ 6.2 Создание квантовых усилителей и генераторов электромагнитного излучения.....	103
§ 6.3 Возникновение и развитие голографии	106
§ 6.4 Нелинейная оптика.....	109
§ 6.5 Применение лазеров.....	110
Глава 7 Физика плазмы и управляемый термоядерный синтез	118
§ 7.1 Плазма и проблема управляемого термоядерного синтеза	118
§ 7. 2 Идея магнитного удержания	122
§ 7.3. Неустойчивости в плазме и борьба с ними	125
§ 7.4. Тороидальные системы: стелларатор	127
§ 7.5. Тороидальные системы: токамак	132
§ 7.6. Возрождение стеллараторов	138
§ 7.7. Лазерный термоядерный синтез	139
§ 7.8 МГД-генератор.....	142
Глава 8 Физика низких температур.....	144
§ 8.1 Сверхтекучесть.....	144
§ 8.2 Создание микроскопической теории сверхпроводимости.....	147
§ 8.3 Макроскопическое квантование	153

§ 8.2 Эффекты Джозефсона	155
§8.5 Высокотемпературная сверхпроводимость	158
Глава 9 Астрофизика и космология	161
§ 9.1 Вторая революция в астрономии: всеволновой характер исследований	161
§ 9.2 Эволюционный характер современной астрономии. Проблема звездной эволюции и источника энергии звезд	167
§ 9.3 Нестационарные модели Вселенной. Концепция расширяющейся Вселенной	171
§ 9.4 Теория Большого Взрыва и ее подтверждение	174
§9.5 Концепция раздувающейся (инфляционной) Вселенной. Идея множественности инфляционных вселенных	176
Список использованных источников	181

Введение

Едва ли будет преувеличением, если сказать, что XX век уникален в истории физической науки. Такой концентрации (и вместе с тем дифференциации) научной мысли, такого богатства и разнообразия принципиально новых физических идей и методов, таких, в полном смысле слова, революционных теорий, как те, что дало физике прошедшее столетие, – эта наука никогда ранее не знала. XX век стал веком новой физики, построенной на идеях пространственно-временного релятивизма и квантовых представлениях об устройстве нашего мира. Несмотря на всю кажущуюся парадоксальность подобных идей и представлений, их, на первый взгляд, несоответствие «здравому смыслу» и повседневному человеческому опыту – новая, квантово-релятивистская физика продолжает изумлять исследователей поразительным согласием предсказанных ею явлений и закономерностей экспериментальным фактам.

Если же не привязываться точно к официальному календарю, то создание современной физической картины мира укладывается практически в 100 лет и включает в себя:

- появление первых гипотез о квантовой природе микромира (Н. Бор, А. Эйнштейн) и создание силами выдающихся ученых: Э. Шредингера, Р. Оппенгеймера, П. Дирака и др. – современной квантовой физики, на основании законов которой (помимо прочего) работает вся микроэлектроника. Физика лазеров, иначе именуемая квантовой электроникой, также (с учетом некоторой специфики) базируется на законах квантовой механики;
- разработка усилиями многих ученых от А. Беккереля и супругов Кюри до Э. Ферми, И.В. Курчатова и А.Д. Сахарова совершенно нового физического раздела – физики атомного ядра и элементарных частиц, за чуть более чем 50 лет прошедшего путь от открытия радиоактивности до создания атомных реакторов, термоядерной бомбы и современных ускорителей элементарных

частиц;

- проведение ряда образцовых экспериментальных работ по определению фундаментальных свойств нашего пространства (А. Майкельсон) приведших к созданию А. Эйнштейном специальной и развитию общей теории относительности;
- помимо этого, можно назвать успехи физики и в таких областях, как термодинамика, теплофизика, химическая физика, космология и т.д.

Все вышесказанное заставляет выделять XX век в истории физики и изучать его более досконально, хотя, разумеется, - в общем контексте развития этой науки и в неразрывной связи с историей физики предшествующих столетий. В то же время приходится констатировать, что учебных пособий, охватывающих всю историю физической науки прошлого столетия, к сожалению, до сих пор не существует. Предлагаемое вниманию читателя пособие призвано, по замыслу его авторов, в какой-то мере восполнить этот пробел. Авторам представляется, что необходимость такого пособия особенно остро ощущается сегодня, когда отечественная высшая школа переходит на двухуровневую систему обучения.

Глава 1 Научная революция конца XIX – начала XX веков

§ 1.1 Создание первых физических лабораторий и научных школ

Вторая половина XIX века характеризуется важными изменениями в организации исследовательских работ по физике и подготовки научных физических кадров. До этого времени физики-исследователи, как правило, работали в одиночку. Необходимые приборы нередко изготавливались самими учеными, либо приобретались ими на собственные средства. Лабораториями обычно служили частные помещения. Так, великий И. Ньютон все опыты по дисперсии света проводил у себя дома, в Вулсторпе; полтора столетия спустя в такой же обстановке ставил свои опыты его соотечественник Дж. Стокс. В России Г. Рихман и М.В. Ломоносов исследовали атмосферное электричество с «громовыми машинами» каждый в своей квартире – оба жили недалеко друг от друга, на Васильевском острове в Петербурге, – это середина XVIII века. Как известно, талантливый физик Г. Рихман трагически погиб во время одного из опытов, убитый разрядом молнии. Ж.-Л. Гей-Люссаку (1778–1850), французскому физiku и химику, лабораторией служило сырое полуподвальное помещение. Предохраняясь от сырости, ученый работал в деревянных башмаках. О.Ж. Френель (1788–1827) проводил свои опыты по дифракции света с примитивными приборами, изготовленными для него сельскими слесарями, в доме своей матери. Таких примеров можно привести немало.

Одной из первых научных лабораторий была та, где работали выдающиеся английские ученые М. Фарадей, Х. Дэви и Дж. Тиндаль. Она была открыта в начале XIX века в Лондоне, в плохо проветриваемом и плохо освещенном помещении. Почти 70 лет эта лаборатория служила для физических исследований и чтения лекций.

Бурное развитие техники в середине XIX века стимулировало развитие науки, связи между наукой и техникой становились крепче и сильнее. Ученые

всё чаще привлекаются к решению технических задач. Так, выдающийся английский физик В. Томсон был научным руководителем проекта по прокладке телеграфного кабеля по дну Антлактики, за успешное решение этой грандиозной задачи он получил титул лорда Кельвина. Лидером в создании научных физических лабораторий выступила Германия, переживавшая в середине XIX века национальный и культурный подъем. Из феодальной страны Германия превращалась в мощную капиталистическую империю, рагромившую в войне Австро-Венгрию и Францию. В немецких лабораториях в разные годы работали и видные российские физики: А.Г. Столетов, Н.П. Авенариус, А.Ф. Иоффе и др. В Англии с 1874 г. существует знаменитая Кавендишская лаборатория при Кембриджском университете. Её основателем и первым руководителем был Дж.Максвелл, впоследствии эту должность занимали Дж. Стретт (лорд Рэлей), Дж. Томсон, Э. Резерфорд.

Первая физическая лаборатория в России была создана в 1865 г. при Петербургском университете Ф.Ф. Петрушевским (1828–1904). В 1878 г. в ней работало уже 115 сотрудников. Одним из учеников Петрушевского был изобретатель радио А.С. Попов. В 70-е годы XIX века физическую лабораторию в Киеве организует Н.П. Авенариус, тогда же в Московском университете – А.Г. Столетов (1839–1896). Он привлек к работе П.Н. Лебедева (1866–1912), создавшего впоследствии замечательную школу русских физиков. После смерти Столетова заведующим лабораторией при Московском университете был Н.А. Умов. В 1860-х гг. возникло Русское физико-химическое общество, из которого в 1873 г. выделилась самостоятельная физическая секция. Развитие российской физической науки было прервано революцией 1917 г. и гражданской войной, после чего науку в России спустя годы пришлось возрождать фактически «с нуля».

§ 1.2 Три крупных экспериментальных открытия конца XIX века: рентгеновские лучи, радиоактивность, электрон

В начале 90-х годов позапрошлого столетия профессор Вюрцбургского университета Вильгельм Конрад Рентген (1845–1923) экспериментировал с так называемой трубкой Крукса, в которой создавались катодные лучи. Однажды по окончании опыта ученый, как обычно, накрыл трубку чехлом из плотного черного картона, но по рассеянности забыл выключить индуктор, питающий трубку. Выключив свет в лаборатории, Рентген внезапно заметил свечение экрана из платиносинеродистого бария, находящегося неподалеку от трубки. Пораженный этим явлением, ученый начал экспериментировать с экраном, удаляя последний от трубки. В своём первом сообщении, опубликованном в статье «О новом роде лучей» (статья датирована 28 декабря 1895 г.), В.К. Рентген указывает, что флюоресценция экрана видна ещё на расстоянии 2-х метров от трубки.

Путем тщательно проведенных опытов Рентген доказал, что картон, непрозрачный ни для солнечного света, ни для электрической дуги, пронизывается каким-то «агентом», вызывающим энергическую флюоресценцию, – этот «агент» он назвал «Х-лучами» (во многих странах и по сей день открыты Рентгеном лучи называются так, как назвал их автор открытия). Рентген исследовал проникающую способность Х-лучей для различных веществ и нашел, что они легко пронизывают бумагу, дерево, тонкие слои металла, но сильно задерживаются свинцом. Затем он обнаружил, что если между трубкой и экраном расположить руку, то видны тёмные тени костей в слабых очертаниях тени самой руки. Это было первое рентгенологическое исследование человеческого тела. Первые рентгеновские снимки ученый приложил к своей брошюре. Он установил, что природа Х-лучей отлична от природы катодных лучей; они не несут заряда и не отклоняются магнитным полем, однако возбуждаются катодными лучами в стеклянных стенках разрядной трубки. Рентген установил, что Х-лучи

возбуждаются и в металлах. Он указал, что новые лучи ведут себя иначе, чем известные к тому моменту ультрафиолетовые, видимые, инфракрасные лучи. По своим химическим и люминесцентным действием они схожи с ультрафиолетовым излучением. Ученый высказал гипотезу (впоследствии не подтвердившуюся), что X-лучи могут быть продольными волнами в эфире.

Опыты Рентгена вызвали огромный интерес в научном мире и были повторены во многих физических лабораториях. В Москве такие опыты проделал П.Н. Лебедев; в Петербурге А.С. Попов демонстрировал их на публичных лекциях, получая различные рентгенограммы. В 1901 г. В.К. Рентген стал первым лауреатом Нобелевской премии по физике.



Рисунок 1 – Приборы, с помощью которых были обнаружены рентгеновские лучи. Трубка Крукса и катушка Румкорфа

Французский физик и математик Анри Пуанкаре (1854–1912 гг.) на заседании Парижской Академии наук 20 января 1896 г. демонстрировал присланные ему Рентгеном снимки и высказал предположение, что рентгеновское излучение связано с флуоресценцией и, возможно, всегда возникает в люминесцирующих веществах, так что никакой катодной трубки для получения X-лучей не нужно.

Среди участников заседания был член Парижской Академии наук Антуан Анри Беккерель (1852 – 1908 гг.), отец и дед которого, как и он сам, много лет занимались флуоресценцией и фосфоресценцией. Он решил проверить предположение Пуанкаре, и уже в феврале 1896 г. Беккерель продемонстрировал действие люминесцирующего сернистого цинка на завернутую в черную бумагу фотопластинку. Затем он решил использовать для опытов соли урана, поскольку они особенно сильно флуоресцировали на солнце.

Беккерель взял из коллекции своего отца двойной сульфат уранила калия. Обернув фотопластинку черной бумагой, он положил её на металлическую пластинку, покрытую слоем урановой соли, и выставил на несколько часов на яркий солнечный свет. После проявления фотопластинки на ней проступило отчетливое изображение металлической пластинки, покрытой слоем урановой соли. Повторные опыты дали аналогичный результат, и 24 февраля 1896 г. ученый доложил об этом в Академии. Казалось, что гипотеза Пуанкаре подтверждается, но осторожный Беккерель решил поставить *experimentum crucis* – контрольный опыт.

В ходе контрольных опытов обнаружилось, что соли урана сами по себе, без всякого внешнего воздействия, испускают невидимые лучи, засвечивающие фотопластинку и проходящие через непрозрачный материал. Второго марта 1896 г. Беккерель сообщил о своем открытии. Было установлено, что «лучи Беккереля» способны ионизировать воздух, разряжать заряженный электроскоп. При этом способность урана испускать такие лучи не ослабевала месяцами.

В конце 1897 г. к исследованию «лучей Беккереля» подключается Мария Склодовская-Кюри (1867–1934) – молодая полька, работающая в Париже. Поставив перед собой вопрос, только ли уран способен испускать «лучи Беккереля», М. Кюри исследовала с помощью электроскопа множество различных образцов – минералов, горных пород и т.д. В апреле 1898 г. М. Кюри обнаруживает еще одно такое вещество – торий. Свойство испускать лучи подобно урану и торию М. Кюри назвала «радиоактивностью».

Тогда же, в апреле 1898 г., М. Кюри обнаружила, что образцы урановой руды из Иохимсталских рудников в Чехии гораздо более радиоактивны, чем чистый уран. Начиная с этого момента, к исследованиям радиоактивности подключается муж М. Кюри – известный французский физик Пьер Кюри (1859–1906). Супруги Кюри высказали предположение, что в иохимсталской руде, помимо урана, содержится новое, еще не известное радиоактивное вещество, и решили выделить его из руды.

После нескольких месяцев напряженного экспериментального труда выяснилось, что в иоакимстальской руде содержится не одно, а два новых радиоактивных вещества. Одно из них – аналог висмута – оказалось в 400 раз активнее урана. М. и П. Кюри назвали новый химический элемент «полоний» – в честь Польши, родины Марии Кюри.

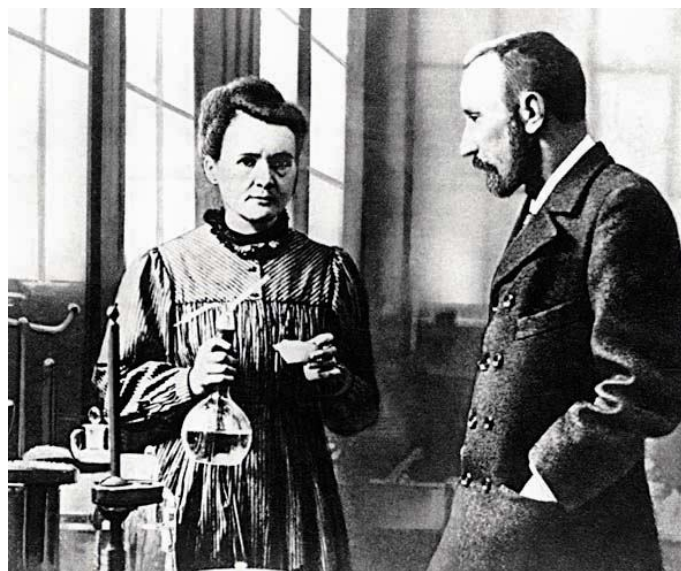


Рисунок 2 – Мария и Пьер Кюри

Другое вещество – аналог бария – обладало активностью в миллион раз выше, чем уран, и было названо «радием», что в переводе с латинского означает «лучистый». В 1903 г. Анри Беккерель, Мария и Пьер Кюри за открытие и исследование радиоактивных веществ были удостоены Нобелевской премии по физике.

В 1897 г. происходит еще одно важное событие в мире физики. В уже упоминавшейся нами Кавендишской лаборатории в Кембридже была наконец разрешена загадка катодных лучей. В течение многих лет о природе этих лучей шёл спор между представителями двух европейских научных школ – немецкой (Г. Герц, Ф. Ленард и др.) и английской (в первую очередь, В. Крукс). В то время как немецкие физики были уверены в том, что катодные лучи представляют собой излучения определенного вида, английские физики придерживались той точки зрения, что так называемые «катодные лучи» на самом деле являются потоком частиц неизвестной природы. Этот спор в конце концов разрешился в пользу сторонников второй, корпускулярной концепции. Доказал корпускулярную природу «катодных лучей» 40-летний директор Кавендишской лаборатории Джозеф Джон Томсон (1856–1940). Он руководил лабораторией с 1884 (после лорда Релея) по 1919 год, когда добровольно сложил с себя полномочия Кавендишского профессора, уступив эту должность

Э. Резерфорду. К концу XIX века Кавендишская лаборатория превратилась в крупнейший исследовательский центр, в международную школу физиков.

Открытие рентгеновских лучей обострило интерес Д.Д. Томсона к явлениям прохождения электрического тока через газы. В 1903 г. выходит в свет монография Томсона «Прохождение электричества через газы». В ходе этих исследований и был открыт электрон.

В то время как воздействие магнитного поля на катодные лучи у физиков сомнений не вызывало, действие на них электрического поля не было общепризнанным: одни авторы утверждали, что они наблюдали воздействие электрического поля на катодные лучи, другие отрицали это. Томсону удалось показать, что это разногласие объяснялось низкой техникой откачки газа. Остатки ионизированного газа в трубке нейтрализуют влияние внешнего электрического поля. Томсон усовершенствовал технику откачки и получил заметные отклонения катодного пучка электрическим полем. Трубка Томсона с впаянными в нее пластинками конденсатора стала прообразом электронно-лучевой трубки – кинескопа.

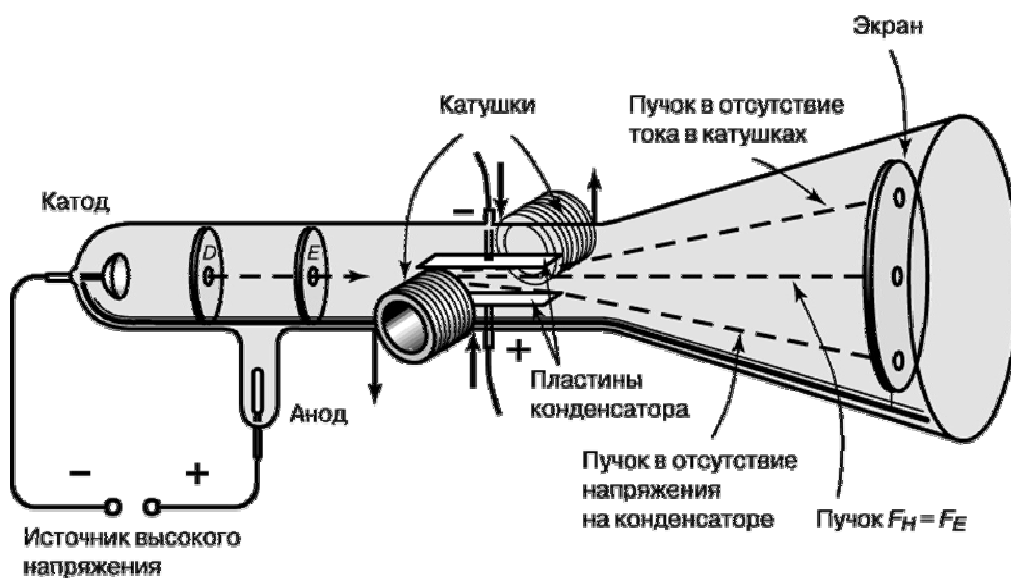


Рисунок 3 – Трубка Томсона для определения удельного заряда электрона

Подвергая катодный пучок действию электрического и магнитного полей, Томсон смог определить отношение заряда частицы к ее массе (удельный заряд). Это отношение оказалось не зависящим от природы газа в трубке и

примерно в 1000 раз большим, чем удельный заряд водородного иона, найденный из законов электролиза. Если принять, что заряд катодной частицы равен по величине заряду иона водорода, то масса такой частицы должна быть в 1000 раз меньше массы самого легкого из атомов. Этот результат был ошеломляющим.

Затем Томсон исследовал отношение заряда к массе для частиц, вырывааемых ультрафиолетовым светом из металлов, для частиц, испускаемых накалившимся катодом, – и всюду порядок величины этого отношения оказался таким же, как для катодных лучей. Открытые Томсоном мельчайшие частицы стали называть электронами (этот термин ввел в свое время Г. Гельмгольц для обозначения элементарных порций электричества, обнаруживаемых при электролизе).

Стало ясно, что электроны должны входить в состав атомов всех веществ. Сам Томсон построил электромагнитную модель атома, предположив, что отрицательно заряженные частицы – электроны – располагаются определенным образом внутри положительно заряженного шара (модель «пудинга с изюмом»). Независимо от Томсона, такую же модель предложил и лорд Кельвин. Однако модель Томсона не выдержала проверку экспериментом и была заменена позднее моделью Резерфорда-Бора, о чем будет подробно рассказано ниже.

Метод Томсона имеет фундаментальное значение. Он лежит в основе устройства электронно-лучевой трубки, первые образцы которой были построены в 1897 г. самим Томсоном и независимо от него Ф.Брауном. Развитие метода Томсона составляет основу электронной оптики, электронных ламп, ускорителей заряженных частиц. Образно говоря, Томсон научил физиков «управлять электронами», и в этом его непреходящая заслуга. В 1906 г. Томсону за его исследование прохождения электричества через газы была присуждена Нобелевская премия по физике. Ученик Томсона Ч.Т.Р. Вильсон в 1911 г. впервые построил в Кавендишской лаборатории камеру для регистрации микрочастиц («камера Вильсона»).

§ 1.3 Исследование строения атома. Модель атома Резерфорда – Бора

Выдающийся английский физик-экспериментатор, уроженец Новой Зеландии Эрнест Резерфорд (1871–1937) работал в 1908 г. в университете Виктории, в Манчестере. Вместе со своим молодым помощником из Германии Хансом Гейгером Резерфорд разработал метод счета α -частиц, которыми занимался к тому времени уже около десяти лет. За фундаментальные исследования свойств различных радиоактивных веществ Резерфорду в 1908 г. была присуждена Нобелевская премия по химии.

Начиная с 1909 г. по заданию Резерфорда два его молодых сотрудника, Ханс Гейгер и Эрнест Марсден, проводят опыты по прохождению α -частиц через металлическую фольгу. Было обнаружено, что вследствие рассеяния выходящий пучок α -частиц несколько расширяется. Однако неожиданным было то, что в среднем одна из приблизительно 8000 частиц после прохождения металлической фольги отклонялась на очень большой угол, приближающийся к 180° . Анализ полученных результатов привел Резерфорда к выводу о наличии у атома твердой, очень тяжелой, но очень маленькой по размеру сердцевины, которую Резерфорд назвал «ядром» атома. Томсоновская модель оказалась несостоятельной.

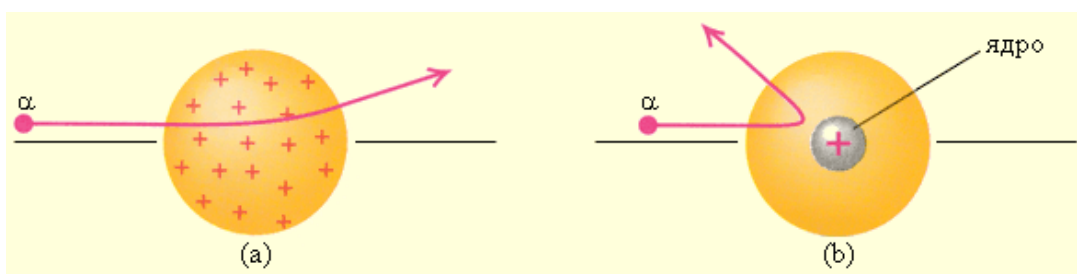


Рисунок 4 – Схема опыта Резерфорда а) для модели атома Томсона, б) для ядерной модели атома Резерфорда

После длительных размышлений и расчетов Резерфорд предложил планетарную модель атома, согласно которой атом уподоблялся миниатюрной

солнечной системе. Подобно тому, как Земля и другие планеты обращаются вокруг солнца по орбитам, близким к круговым, в планетарной модели атом и электроны обращаются вокруг ядра. Весной 1911 г. в журнале «*Philosophical Magazine*» выходит статья Резерфорда «Рассеяние α - и β -частиц в веществе и структура атома», где дается описание планетарной модели. Однако и самому Резерфорду, и другим физикам было ясно, что такая модель атома не совместима с основными положениями классической физики. В самом деле, согласно законам электродинамики, обращающийся по орбите электрон должен непрерывно излучать электромагнитные волны и, как следствие, – постепенно, потеряв всю энергию на излучение, упасть на ядро (расчет показал, что электрону для падения на ядро потребуется примерно 10^{-10} с). Спектр излучаемых при этом электромагнитных волн должен был быть сплошным. Экспериментальные же данные свидетельствуют о прямо противоположном: атомы устойчивы и спектры их отнюдь не сплошные, а линейчатые, причем спектральные линии образуют группы – серии.

В начале 1912 года в Манчестере появился молодой датский физик Нильс Бор, незадолго до этого защитивший в своем родном Копенгагене докторскую диссертацию. Бор сразу же был ознакомлен с той «драмой идей», которая развернулась вокруг резерфордовской планетарной модели. Проанализировав все особенности модели, а также закономерности, которым подчинялись спектры водорода (наличие серий, комбинационный принцип и др.), и учитывая планковскую гипотезу о световых квантах (см. ниже), Бор предложил свою трактовку планетарной модели атома водорода. Теория Бора прямо противоречила классическим представлениям, но хорошо согласовывалась с опытными данными для водородного спектра. Основные положения теории были сформулированы Бором в виде постулатов: подразумевалось, что в будущем будет создана последовательная и полная теория атома, в которой постулаты Бора найдут свое объяснение. (Так оно и оказалось: пройдет чуть более десяти лет, и не без активного участия самого Бора его учениками будет построена квантовая механика). Свою теорию Бор изложил в опубликованной в

журнале «Nature» в 1913 г. статье «О строении атомов и молекул».

Теория Бора была, безусловно, большим шагом вперед, к пониманию поведения и свойств атома, и сыграла огромную роль в построении последующей, более точной, квантовой теории. В то же время эта теория была внутренне противоречивой, поскольку не являлась ни последовательно классической, ни последовательно квантовой, и лучше других эту её непоследовательность понимал сам

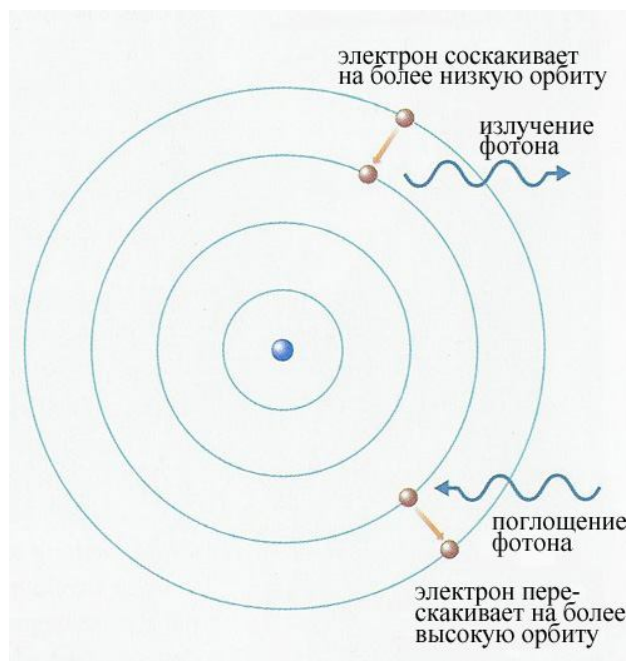


Рисунок 5 – Модель атома Бора. Стационарные орбиты и разрешенные переходы

Бор. Так, при попытке применить боровскую теорию к следующему после водорода атому гелия обнаружилось резкое расхождение с опытом. Кроме того, теория Бора, совершенно правильно предсказывающая частоты спектральных линий всех серий в водороде, совершенно ничего не могла сказать об интенсивностях этих линий. Однако результаты некоторых других экспериментов подтверждали правильность боровской теории. Таким примером может служить результат опыта Франка и Герца (1914 г.), напрямую подтвердивший дискретность энергетических состояний в атоме ртути.

Глава 2 Развитие квантовых представлений и становление квантовой теории

§ 2.1 Проблема теплового излучения и гипотеза о световых квантах

Опыт показывает, что так называемое равновесное тепловое излучение, т.е. излучение, испускаемое нагретыми телами, подчиняется вполне определенным закономерностям. Теоретическое осмысление этих закономерностей привело в ряде случаев к резкому противоречию между экспериментальными фактами, с одной стороны, и фундаментальными положениями классической физики – с другой.

В 1859 г. немецкий физик Густав Роберт Кирхгоф (1824–1887), исходя из соображений термодинамики, установил, что при тепловом равновесии достигается равенство между энергией, поглощаемой телом, и энергией, им излучаемой. Это равенство выполняется для любых равновесных систем и не зависит от размеров, формы и свойств тел, входящих в систему. Кирхгоф ввел в употребление понятие абсолютно чёрного тела (АЧТ), т.е. тела, поглощающего всю падающую на него энергию излучения независимо от длины волны. Строго говоря, абсолютно черных тел в природе нет, однако Кирхгоф указал способ построения АЧТ в виде замкнутой полости с небольшим отверстием, внутренние стенки которой хорошо проводят тепло и покрыты сажей.

Для произвольного тела закон Кирхгофа имеет вид:

$$\frac{E(\nu, T)}{A(\nu, T)} = \varepsilon(\nu, T),$$

где $E(\nu, T)$ - испускательная способность тела, зависящая от его температуры T и частоты излучения ν , $A(\nu, T)$ – поглощательная способность тела, $\varepsilon(\nu, T)$ – универсальная функция частоты и температуры. Для абсолютно черного тела, по определению, $A(\nu, T)=1$, поэтому $\varepsilon(\nu, T)$ имеет смысл испускательной

способности АЧТ.

После установления этого закона встал вопрос о нахождении явного вида функции $\varepsilon(\nu, T)$. Основу для её экспериментального изучения заложил сам Кирхгоф: он указал, что если вывести излучение из небольшого отверстия в стенке полости, моделирующей АЧТ, и разложить его в спектр, то можно с помощью калориметрических измерений установить вид зависимости $\varepsilon(\nu, T)$. Правда, на этом пути встретилось немало экспериментальных трудностей, но все они со временем были преодолены.

В 1879 г. профессор Венского университета Йозеф Стефан (1835–1893) опубликовал статью «О зависимости теплового излучения от температуры», где определил интегральную испускательную способность АЧТ при различных температурах. Оказалось, что интегральная испускательная способность $\varepsilon(T)$, т. е. излучение всевозможных частот с единицы поверхности тела, пропорциональна четвертой степени температуры:

$$\varepsilon(T) = \sigma \cdot T^4, \quad (1)$$

где постоянная $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$.

Эта закономерность была экспериментально подтверждена Г. Герцем в 1880 г. в интервале температур от 0 до 250 °С. О. Люммер и Ф. Курлбаум в 1897 г. на гораздо более современной аппаратуре проверили и подтвердили найденное Стефаном соотношение (1) для температур от 290 до 1500 °С.

Теоретически зависимость интегральной испускательной способности АЧТ от температуры вывел в 1884 г. выдающийся австрийский физик Людвиг Больцман (1844 – 1906). Он показал, что закон Стефана является следствием законов термодинамики и вытекает из того факта, что давление излучения равно одной трети энергии, приходящейся на одну степень свободы (последнее соотношение Больцман получил сам, независимо от Максвелла, пришедшего к этой формуле несколькими годами ранее). Больцман показал также, что константа σ не универсальна, как думал Й. Стефан, а годится только для АЧТ. Поэтому закон (1) для интегральной испускательной способности АЧТ стали называть законом Стефана-Больцмана.

По мере совершенствования аппаратуры экспериментаторы смогли исследовать испускательную способность АЧТ как функцию и температуры, и частоты. Так, в 1899-1900 гг. О. Люммер и Э. Принсгейм изучили функцию $\varepsilon(\nu, T)$ в видимой части спектра, Бекман (1898 г.) и

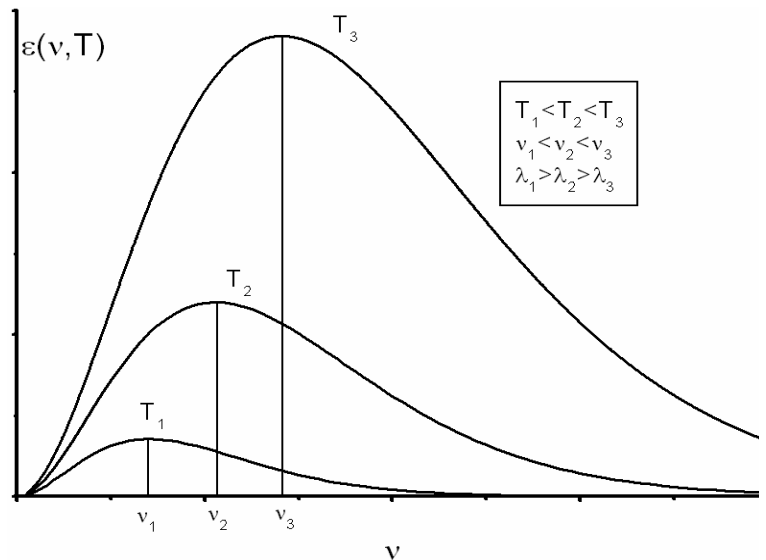


Рисунок 6 – Спектральная излучательная способность АЧТ. Закон смещения Вина

Пашен (1899 г.) – в области ИК излучения при температурах от 420 до 1600 °С, а Байш (1911 г.) – в УФ области. Таким образом, к концу XIX века был в общих чертах установлен вид зависимости $\varepsilon(\nu, T)$. Однако почти сразу возник ряд вопросов, на которые классическая физика не могла ответить. Например, было неясно, почему при обычных температурах твёрдые вещества типа железа не излучают в видимой области спектра.

Дальнейшие исследования теплового излучения связаны с именем немецкого физика Вильгельма Вина (1864 – 1928). В 1893 г. Вин показал, что испускательная способность АЧТ пропорциональна произведению куба частоты на некоторую функцию, зависящую от отношения ν/T

$$\varepsilon(\nu, T) = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right). \quad (2)$$

Несмотря на то, что Вин не нашел явного вида функции $f(\nu/T)$ для всего спектра излучения АЧТ, его формула (2) сыграла большую роль в установлении правильного выражения для $\varepsilon(\nu, T)$. Во-первых, выведенная Вином формула была точным критерием для других выдвигаемых формул, т.е. любая формула для $\varepsilon(\nu, T)$ должна была иметь вид формулы (2), поскольку последняя основывалась только на законах термодинамики. Во-вторых из неё можно вывести закон Стефана-Больцмана (1). Наконец, в-третьих, из этой формулы

сразу следует закон смещения Вина:

$$\frac{\nu_m}{T} = \text{const}, \text{ или } \lambda_m T = \text{const}, \quad (3)$$

где ν_m – частота, λ_m – длина волны, отвечающие максимуму испускательной способности при данной температуре. Справедливость закона смещения Вина (3) была подтверждена экспериментально. Этот успех был последним достижением классической физики в объяснении свойств АЧТ. Вин был удостоен Нобелевской премии по физике в 1910 г.

В 1896 г. Вин привёл явное выражение для испускательной способности АЧТ:

$$\varepsilon(\nu, T) = a \nu^3 e^{-b \frac{\nu}{T}} \quad (4)$$

Или в терминах длин волн,

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{C_1}{\lambda^3} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}, \quad (4')$$

где a и b (соответственно, C_1 и C_2) – эмпирические постоянные. Из формулы (4') легко получается закон смещения Вина. Однако формулы (4) и (4') удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными лишь в области высоких частот.

В 1900 г. английский физик Джон Уильям Стретт (лорд Релей), президент Лондонского Королевского общества, выступил с критикой формулы Вина, заметив, что, согласно этой формуле, с ростом температуры излучение данной длины волны должно стремиться к определенному конечному пределу, что противоречит опыту. Релей понял, что термодинамика не в состоянии решить проблему теплового излучения и надо привлекать к её решению статистическую физику. Он рассмотрел кубическую полость, заполненную равновесным излучением, в которой устанавливается система стоячих волн (нормальных мод). Число нормальных мод электромагнитного излучения в единице объема, как показал Релей, равно:

$$dn(\omega) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} d\omega.$$

Для нахождения спектральной плотности излучения Релей воспользовался одним из основных положений классической статистической физики, а именно, теоремой о равномерном распределении энергии по степеням свободы. В итоге им была получена формула:

$$\rho(\omega, T) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} kT. \quad (5)$$

Аналогичное соотношение с применением методов классической статистической механики к излучению в полости, получил английский астроном и физик Джеймс Хопвуд Джинс (1877-1946):

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{\nu^2}{c^2} kT.$$

(спектральная плотность излучения ρ связана с излучательной способностью соотношением $\varepsilon(\nu, T) = c \cdot \rho(\omega, T)/4$).

Формула Релея-Джинса (5) оказалась справедливой лишь для больших длин волн (для малых частот). Это драматическое расхождение между формулой, полученной с использованием всего арсенала классической физики, и опытными данными (серьезные расхождения приходились на УФ часть спектра) получило название

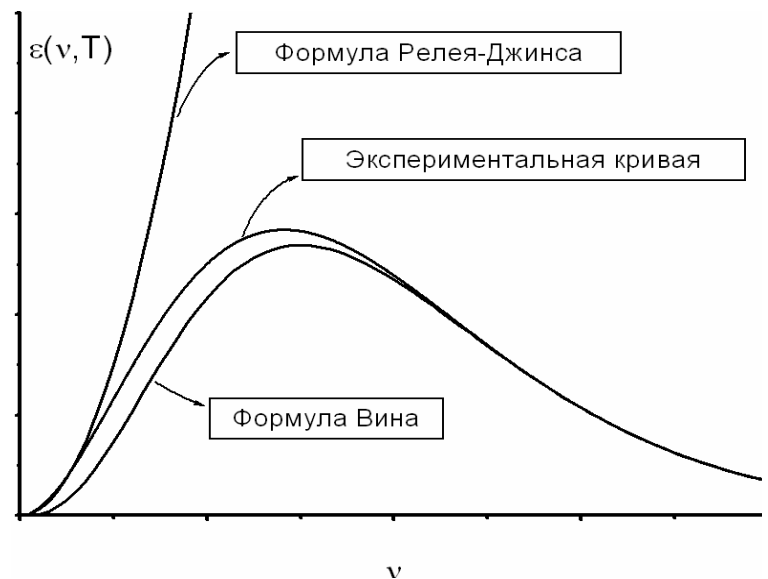


Рисунок 7 — «Ультрафиолетовая катастрофа». Кардинальные расхождения экспериментальных и теоретических зависимостей

«ультрафиолетовой катастрофы». Собственно говоря, неограниченный рост спектральной плотности излучения с частотой с точки зрения классических представлений вполне понятен. Дело в том, что число степеней свободы

электромагнитного поля бесконечно велико, тогда как дискретная материя (стенки полости) состоит из атомов и потому обладает конечным числом степеней свободы. Следовательно, в соответствии с классической теоремой о равномерном распределении, вся энергия от материальных тел должна постепенно перейти в излучение.

В конце 90-х годов XIX века проблемой АЧТ заинтересовался выдающийся немецкий физик Макс Карл Эрнст Людвиг фон Планк (1858-1947). Планк усмотрел в выводе Релея существенные недостатки. Он счёл их настолько серьезными, что в своих работах нигде не ссылался на работу Релея. Планк положил в основу своего исследования представления классической электродинамики в совокупности с новейшими достижениями статистической физики. В частности, он одним из первых использовал введенное Клаузиусом понятие энтропии. Первым достижением Планка в работе над проблемой АЧТ был новый вывод уже известного в то время закона Вина (2), а также формулы Релея-Джинса (5). При этом Планк воспользовался своеобразной моделью тела – ансамблем вибраторов Герца – и уравнением, связывающим энтропию системы осцилляторов с их средней энергией, которое было им получено из чисто термодинамических соображений. Планку стало ясно, что для продвижения вперед нужны какие-то новые идеи. В своих поисках Планк руководствовался идеей о том, что формулы, описывающие наиболее общие законы природы, должны быть максимально простыми. Эта мысль сыграла важную роль в получении правильной формулы, поскольку на некоторых этапах работы Планк пользовался эмпирическими соображениями, которые не всегда можно было строго обосновать.

В конце 1900 г. Планку удалось найти формулу, одинаково хорошо описывающую испускательную способность АЧТ для всех длин волн. 14 октября 1900 г. он сделал в Немецком физическом обществе доклад «Об одном улучшении закона излучения Вина», где была приведена найденная им формула:

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{\alpha \nu^3}{e^{\frac{\beta \nu}{T}} - 1} \quad (6)$$

Здесь α и β эмпирические постоянные, численные значения которых Планк нашел по точкам опытных кривых, полученных в экспериментах Э.Принсгейма, Ф.Кольрауша и др. После опубликования статьи Планка Г.Рубенс и др. проверили планковскую формулу (6) и получили блестящее согласие с опытом.

В последующих работах Планк попытался обосновать найденную формулу теоретически. Он решил, что неудачи в выводе выражения для $\varepsilon(\nu, T)$, которое бы правильно описывало весь частотный диапазон, связаны с тем, что средняя энергия осциллятора ε считалась равной kT – это следовало из классической теоремы о равнораспределении. Планк предложил другой способ вычисления средней энергии, выдвинув гипотезу о том, что обмен энергией между электромагнитным полем и атомом – осциллятором происходит порциями, равными $n\varepsilon_0$, где n – натуральное число, а ε_0 – минимальная энергия, которая может быть передана осциллятору (квант энергии). Тогда средняя энергия осциллятора вычисляется так:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_n n\varepsilon_0 e^{\frac{-n\varepsilon_0}{kT}}}{\sum_n e^{\frac{-n\varepsilon_0}{kT}}} = \frac{\varepsilon_0}{e^{\frac{-\varepsilon_0}{kT}} - 1} \neq kT.$$

При таком определении средней энергии вычисления полной энергии, испускаемой абсолютно черным телом в единицу времени, полностью согласовывались с законом Стефана-Больцмана.

Предложенная Планком формула соответствовала формуле Вина (2), в которой

$$f\left(\frac{\nu}{T}\right) = \frac{\alpha}{e^{\frac{\beta \nu}{T}} - 1} \quad (7)$$

Отсюда следовало, что минимальная порция энергии пропорциональна частоте: $\varepsilon_0 = \beta \nu = h \nu$, где коэффициент пропорциональности $\beta \equiv h$ с тех пор называют постоянной Планка, или планковским квантом действия (размерность

этой постоянной – «энергия * время», т. е. равна размерности действия).

Планк хорошо понимал, что его гипотеза о вычислении средней энергии основанная на идее квантования энергии, не укладывается в рамки классической физики, и это приводило его в отчаяние. До конца своих дней Планк оставался физиком XIX века; новая квантовая физика, у истоков которой стоял он сам, так и осталась ему чуждой.

§ 2. 2 *Дальнейшее развитие учения о квантах в работе А. Эйнштейна. Создание А. Эйнштейном и П. Дебаем квантовой теории теплоёмкости твердых тел*

1905 год был наиболее плодотворным в научной деятельности величайшего физика XX века Альберта Эйнштейна (1879-1955). В частности, в апреле 1905 г. Эйнштейн публикует в журнале «Annalen der Physik» статью под названием «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света». Во введении к этой статье Эйнштейн, отталкиваясь от идеи Планка о квантах излучения, пишет: **«Волновая теория света, оперирующая непрерывными в пространстве функциями, может оказаться приводящей к противоречию с опытом, когда её будут применять к явлениям возникновения и превращения света. Я думаю, что опыты, касающиеся излучения твердого тела, фотолюминесценции, возникновения катодных лучей при освещении ультрафиолетовыми лучами, и другие группы явлений, связанных с возникновением света, лучше могут объясняться предположением, что энергия света распределяется по пространству дискретно. Согласно этому предположению, энергия пучка света, вышедшего из некоторой точки, не распределяется непрерывно во все возрастающем объеме, а складывается из конечного числа локализованных в пространстве неделимых квантов энергии, поглощаемых или возникающих только нацело».**

Эйнштейн рассмотрел следующую задачу. В объеме V находится

излучение с плотностью ρ , и требуется определить его энтропию. Используя найденную Вином формулу для плотности излучения, он получил формулу для энтропии излучения. Сравнивая это выражение с выражением для энтропии идеального газа, Эйнштейн убедился в их сходстве. Более того, поскольку вероятность нахождения N молекул в объеме v , составляющем часть объема V , равна:

$$\omega = \left(\frac{v}{V} \right)^N,$$

а аналогичная вероятность для излучения

$$\omega = \left(\frac{v}{V} \right)^{\frac{N_A E}{R \beta v}},$$

Эйнштейн сделал вывод: **«Монохроматическое излучение малой плотности (в пределах области применимости закона излучения Вина) в смысле теории теплоты ведет себе так, как будто оно состоит из независимых друг от друга квантов энергии величиной**

$$\varepsilon = \frac{E}{N} = \frac{R \beta v}{N_A}.$$

В этой же статье Эйнштейн проанализировал фотоэффект с точки зрения гипотезы о световых квантах. Фотоэффект, открытый экспериментально Г. Герцем в 1887 г., представляет собой возникновение «катодных лучей», т. е. потока электронов, под действием падающего на поверхность металла электромагнитного излучения (чаще всего – ультрафиолетового).

В 1888 – 1890 гг. фотоэффект был детально исследован в опытах выдающегося русского физика А. Г. Столетова (1839-1896). До появления работы Эйнштейна 1905 г. некоторые обнаруженные Столетовым закономерности фотоэффекта не поддавались объяснению. Эйнштейн в своей теории предположил, что электрон, взаимодействуя с квантом света энергии $\varepsilon = h\nu$, поглощает по крайней мере часть этой энергии. Получив таким образом дополнительную кинетическую энергию, электрон может, преодолев потенциальный барьер, характерный для данного металла (последний называют «работой выхода»),

выйти через поверхность металла наружу и создать в целом фототок. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта (в современных обозначениях) имеет вид

$$h\nu = A_{\text{out}} + \frac{m_e u_{\text{max}}^2}{2}$$

и представляет собой фактически закон сохранения энергии для акта поглощения фотона электроном в металле.

После появления работы Эйнштейна картина взаимодействия света и вещества приобрела большую определенность: Планк предположил, что атомные осцилляторы при взаимодействии с излучением меняют свою энергию только порциями – квантами, а Эйнштейн пришел к выводу, что **«данное Планком определение элементарных квантов не зависит от созданной им теории теплового излучения»**. Заметим, что именно за работу по созданию теории фотоэффекта Эйнштейну в 1921 г. была присуждена Нобелевская премия по физике.

В 1907 г. Эйнштейн делает первый существенный шаг в применении теории квантов не к излучению, а к веществу: он публикует в журнале «Annalen der Physik» статью «Теория излучения Планка и теория теплоемкости». Эта статья, по существу, положила начало широкому использованию квантовой теории для решения различных физических проблем.

Интерес к теплоемкости был вызван тем, что она является одной из важнейших термодинамических характеристик вещества, к тому же – сравнительно легко определяется экспериментально. Но, что особенно важно, – опытные данные по теплоемкости находились в то время в резком противоречии с теоретическими предсказаниями. Классический подход к вычислению теплоемкости кристаллической решетки, основанный на применении теоремы о равнораспределении, приводит к выражению для полной энергии колебаний молярного кристалла

$$E = 3N_A \varepsilon = 3RT, \quad (8)$$

где средняя энергия осциллятора в узле решетки

$$\varepsilon = kT . \quad (9)$$

Отсюда получается теплоемкость

$$c_V = \frac{dE}{dT} = 3R .$$

Это – эмпирический закон Дюлонга и Пти. Эйнштейн, воспроизведя в своей статье данный результат, показал, что он прямо противоречит опытным фактам и справедлив лишь при достаточно высоких температурах. Поэтому Эйнштейн отказывается от классической формулы (9) для средней энергии осциллятора и заменяет ее другим соотношением, учитывающим «квантованность» энергии:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_n n\varepsilon e^{\frac{-n\varepsilon}{kT}}}{\sum_n e^{\frac{-n\varepsilon}{kT}}} = \frac{\varepsilon}{e^{\frac{\varepsilon}{kT}} - 1} = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} . \quad (10)$$

Отсюда получаются новые, квантовые выражения для энергии решетки

$$E = \frac{3N_A h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (11)$$

и ее молярной теплоемкости

$$c_V = \frac{dE}{dT} = 3R \frac{\left(\frac{h\nu}{kT}\right)^2 e^{\frac{h\nu}{kT}}}{\left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1\right)^2} . \quad (12)$$

Нетрудно убедиться, при $h\nu \ll kT$, т. е. при высоких температурах, формула Эйнштейна (12) приводит к классическому закону Дюлонга и Пти, а в противоположном предельном случае – при $T \rightarrow 0$, получаем приближенное выражение для теплоемкости

$$c_V \approx \frac{dE}{dT} = 3R \left(\frac{h\nu}{kT}\right)^2 e^{\frac{-h\nu}{kT}} . \quad (13)$$

Из (13) следует, что при $T \rightarrow 0$ теплоемкость $c_V \rightarrow 0$, что находится в качественном согласии с опытом (и с третьим началом термодинамики).

Однако более тщательные измерения решеточной теплоемкости при очень низких температурах показали, что экспериментальные точки хорошо ложатся на кубическую зависимость $c_V \sim T^3$, в отличие от (13).

Причиной этого количественного расхождения между теорией Эйнштейна и опытом явилось то, что все атомы твердого тела в модели Эйнштейна колеблются с одной и той же частотой, т. е. независимо друг от друга. Между тем, из опыта известно, что в кристалле могут

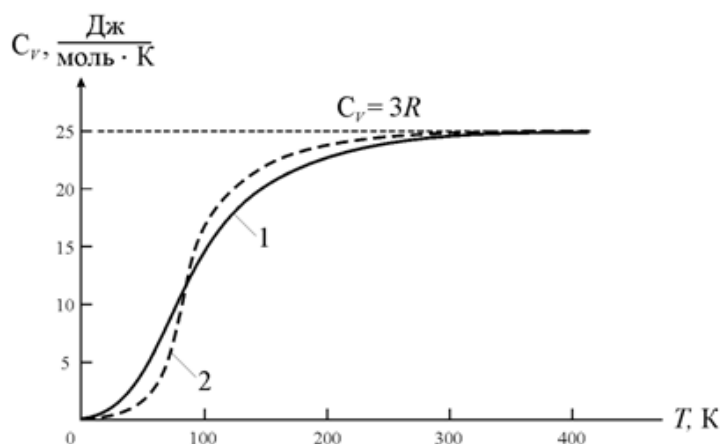


Рисунок 8 – Зависимость теплоемкости твердого тела от температуры. 1 – по формуле Дебая, 2 – по формуле Эйнштейна

присутствовать различные частоты колебаний, образующие целый набор нормальных мод данного кристалла. Было очевидно, что работы Эйнштейна, явившись первым квантовым исследованием в физике кристаллов, тем не менее нуждаются в усовершенствовании. Более точную теорию теплоемкости решетки построил в 1912 г. немецкий физик Петер Дебай (1884-1966).

Дебай в своей теории исходил из того, что твердое тело представляет собой систему связанных осцилляторов, колеблющуюся с различными частотами. При этом наибольший вклад в энергию кристалла вносят длинноволновые колебания. Для таких колебаний можно не учитывать атомную структуру кристалла, поскольку соответствующая длина волны оказывается много большей межатомного расстояния и кристалл можно рассматривать как сплошную упругую среду. Дискретность же структуры кристалла Дебай учел, введя наибольшее значение для частоты возможных колебаний ω_{\max} – «предельная дебаевская частота».

В модели Дебая выражение для теплоемкости решетки в случае высоких температур $T \gg \Theta$, где

$$\Theta = \frac{\hbar \omega_{\max}}{K}$$

есть характеристическая дебаевская температура кристалла, приводит к закону Дюлонга и Пти; в случае же очень низких температур $c_V \sim T^3$, в точном соответствии с экспериментальными данными (т.н. «закон T^3 Дебая»).

§ 2.3 Работы А. Эйнштейна по квантовой теории излучения

В 1916 г. Эйнштейн опубликовал две работы, сыгравшие большую роль в дальнейшем развитии квантовой физики и оптики. Первая из работ называлась «Испускание и поглощение излучения по квантовой теории», вторая – «К квантовой теории излучения» – дополняла некоторые утверждения первой.

Во введении к первой из этих работ Эйнштейн указывает на непоследовательность теории Планка. В самом деле, связь между объемной плотностью энергии и энергией одного атомного осциллятора, лежащая в основе планковского подхода, была чисто классической, а вычисление средней энергии осциллятора проводилось на основе квантовой гипотезы Планка. Эйнштейн считал, что два эти предположения, противореча друг другу, не могут лежать в основе теории: теория должна быть внутренне непротиворечивой.

По его мнению, основные идеи квантового подхода следует сохранить, но взаимодействие атомов с излучением следует описывать непротиворечивым образом. В первом параграфе статьи, который назывался «Резонатор Планка в поле излучения», Эйнштейн показал, что расчет, основанный на балансе энергии между излучением резонатора, работой электромагнитного поля волны над ним и, следовательно, ее поглощением, может привести только к классическим результатам Вина и Релея – Джинса, но никак не к формуле Планка.

Основным в статье является второй параграф, озаглавленный «Квантовая теория и излучение». В ее основе лежит анализ взаимодействия вещества с полем в предположении, что атомы могут находиться в дискретных состояниях

с энергиями E_1, E_2, \dots . При этом вероятность W_n нахождения в n -ом состоянии дается распределением Больцмана:

$$W_n = \Gamma_n e^{-\frac{E_n}{kT}},$$

где Γ_n – статистический вес состояния, т. е. число способов, которыми оно может быть реализовано. При поглощении излучения частоты ν_{mn} происходит переход между двумя соответствующими уровнями, причём Эйнштейн вначале считал, что равновесие будет иметь место, если рассматривать переход с верхнего уровня m на нижний n с излучением, а обратный переход – с поглощением. Эйнштейн сформулировал так называемый «принцип детального равновесия», согласно которому между любыми двумя уровнями должно существовать динамическое равновесие: число переходов сверху вниз с испусканием излучения и число переходов снизу вверх с его поглощением должно быть одинаковым. Оказалось, однако, что при тепловом равновесии двух уровней, между которыми возможны только переходы двух вышеуказанных типов, получить формулу Планка не удастся.

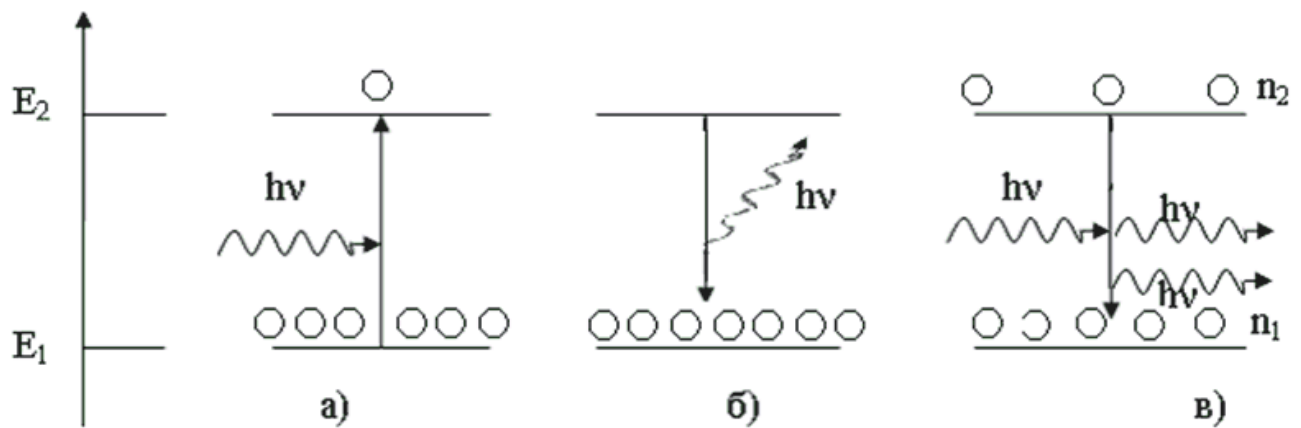


Рисунок 9 – Взаимодействие света и вещества. а) – индуцированное поглощение, б) – спонтанное испускание и в) – вынужденное испускание кванта света

После более тщательного рассмотрения этих переходов Эйнштейн приходит к выводу: помимо спонтанного испускания, связанного с тем, что в возбужденном состоянии атом находится короткое время, после чего электрон

переходит на нижний уровень, испуская квант излучения с энергией $E_m - E_n$, должны существовать и другие переходы – вынужденные или индуцированные. Если первые переходы аналогичны радиоактивному распаду, т. е. происходят случайным образом, то открытое Эйнштейном индуцированное испускание определяется воздействием на атом внешнего излучения.

Таким образом, Эйнштейн вводит в квантовую физику время. Заметим, что в боровской теории время вообще не фигурировало: с временной точки зрения, теория Бора была теорией дальнего действия. Бор не мог детально описать переход между уровнями m и n ; он лишь утверждал, что разность их энергий равна $h\nu$. Боровское правило частот

$$\nu_{mn} = \nu_{nm} = \frac{E_m - E_n}{h} \quad (14)$$

Эйнштейн принимает безоговорочно и использует во всех дальнейших расчетах.

Чтобы отличить спонтанные переходы от вынужденных, А. Эйнштейн вводит понятие вероятности перехода. Заметим, что до рассматриваемой работы Эйнштейна это понятие, сыгравшее в дальнейшем развитии атомной физики огромную роль, не вводилось вообще. Согласно Эйнштейну, число спонтанных переходов между уровнями m и n за время dt есть

$$dZ_{mn}^* = dN_m = A_{mn} N_m dt$$

где dN_m – убыль электронов на верхнем уровне m ; N_m – число этих электронов к рассматриваемому моменту t ; A_{mn} – коэффициент Эйнштейна для спонтанного испускания.

Интегрирование формулы (15) дает закон убывания количества электронов на верхнем уровне за счет спонтанных переходов, вполне аналогичный резерфордовскому закону радиоактивного распада:

$$N_m(t) = N_m(0)e^{-A_{mn}t}. \quad (16)$$

Чтобы убедиться в этой аналогии, Эйнштейн подсчитывает среднее время жизни τ электрона в возбужденном состоянии:

$$\tau = \frac{\int_0^\infty dZ_{mn}}{N_m(0)} = A_{mn} \int_0^\infty e^{-A_{mn}t} dt = \frac{1}{A_{mn}}, \text{ или } A_{mn} = \frac{1}{\tau}.$$

Т.о. коэффициент Эйнштейна A_{mn} есть величина, обратная среднему времени жизни τ возбужденного атома. Подобное же соотношение было получено Резерфордом для константы радиоактивного распада.

Далее, интенсивность спонтанного излучения на основании (15) и (16) равна:

$$dI = h\nu dZ_{mn} = h\nu A_{mn} N_m dt, \text{ или } I(t) = I_0 e^{-A_{mn}t},$$

что также повторяет закон радиоактивного распада.

Переходы с поглощением рассматриваются Эйнштейном аналогично. Число переходов $n \rightarrow m$ должно быть пропорционально числу электронов на нижнем уровне, а также объемной плотности энергии поля ρ_ν т.е.:

$$dZ_{nm} = B_{nm} N_n \rho_\nu dt,$$

где B_{nm} – коэффициент Эйнштейна для вынужденного поглощения. Центральным пунктом работы явилось постулирование Эйнштейном еще одного вида переходов в атоме – с возбужденного в невозбужденное состояние под действием внешнего поля:

$$dZ_{mn}^* = B_{mn} N_m \rho_\nu dt,$$

где B_{mn} – коэффициент Эйнштейна для вынужденного испускания. Смысл такого процесса в том, что поле, проходя сквозь вещество, «сталкивает» электрон с верхнего уровня на нижний, и этот процесс также пропорционален плотности энергии поля.

Согласно сформулированному Эйнштейном принципу детального равновесия, должно выполняться соотношение

$$dZ_{mn}^* + dZ_{nm} = dZ_{nm}$$

или

$$A_{mn} N_m + B_{mn} N_m \rho_\nu = B_{nm} N_n \rho_\nu. \quad (17)$$

Учитывая, что справедливо распределение Больцмана,

$$\frac{N_m}{N_n} = \frac{\Gamma_m e^{-\frac{E_m}{kT}}}{\Gamma_n e^{-\frac{E_n}{kT}}}$$

формула (17) приводит к выражению для объемной плотности энергии излучения

$$\rho_\nu = \frac{A_{mn}\Gamma_m}{\frac{h\nu}{B_{nm}\Gamma_n e^{\frac{h\nu}{kT}} - B_{mn}\Gamma_m}} \quad (18)$$

Чтобы найти соотношение между коэффициентами B_{nm} и B_{mn} Эйнштейн воспользовался установленным Н. Бором принципом соответствия. При очень высоких температурах плотность энергии также должна стремиться к бесконечности, т. е. знаменатель в (18) при $T \rightarrow \infty$ должен обращаться в 0. Отсюда следует, что

$$B_{nm}\Gamma_n = B_{mn}\Gamma_m$$

Для невырожденных уровней, и получается очень важный результат $B_{nm} = B_{mn}$, т. е. коэффициенты Эйнштейна для вынужденного испускания и вынужденного поглощения равны между собой. Это свойство позволяет более компактно записать формулу (18):

$$\rho_\nu = \frac{A_{mn}}{B_{mn}} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (19)$$

Далее, на основании принципа соответствия можно утверждать, что в предельном случае малых частот формула (19) должна переходить в закон Релея-Джинса

$$\rho_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT \quad \text{и} \quad \frac{A_{mn}}{B_{mn}} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} h\nu, \quad (20)$$

откуда Эйнштейн получает окончательный вид формулы Планка:

$$\rho_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}.$$

Этот результат явился крупным успехом теории излучения Планка –

Эйнштейна.

Подводя итоги работам Эйнштейна по теории излучения, отметим следующее. Во-первых, в этих работах в теории излучения были впервые введены понятия вероятности переходов и времени жизни атома в том или ином состоянии. (Любопытно отметить, что в дальнейшем Эйнштейн не согласился принять вероятностный подход, присущий квантовой механике, и считал ее лишь переходным этапом на пути к «подлинной», детерминистической физике микромира. Широко известно выражение Эйнштейна: **«Я не могу поверить, что Господь Бог играет в кости»**. Однако дальнейшее развитие физики показало неправоту Эйнштейна в данном вопросе: вероятность органически присуща микрообъектам и принципиально неустранима). Во-вторых, был введен принцип детального равновесия, сыгравший большую роль в последующем развитии различных областей физики.

Величайшее открытие, сделанное Эйнштейном в теории излучения, – открытие вынужденного испускания света, по существу означало, что в результате прохождения света через вещество при наличии вынужденного испускания будет возрастать интенсивность света по мере движения волны, а это равнозначно отрицательному поглощению. Надо отметить, однако, что ни сам Эйнштейн, ни другие физики начала прошлого века не сделали практических выводов из этого открытия. Потребовалось несколько десятилетий, чтобы открытие вынужденного испускания света атомами привело к созданию нового направления в физике – физики квантовых усилителей и генераторов и нелинейной оптики. Подробнее об этом будет рассказано в соответствующей главе.

§ 2.4 Гипотеза де Бройля. Соотношение неопределенностей

В 1923 г. молодой французский физик Луи де Бройль (1892 – 1987) представил к защите докторскую диссертацию под названием «О теории

квантов» и успешно защитил ее осенью 1924 года. В этой работе автор впервые высказал идею, что не только световые волны обладают корпускулярными свойствами, но и частицы, в частности электроны, обладают своеобразными волновыми свойствами. Главная особенность такого подхода состояла в необычности свойств этих волн, имеющих, как было позднее показано М.Борном (1882 – 1970), вероятностный характер, а именно: квадрат амплитуды волны дает вероятность нахождения частицы в данном месте. Впоследствии Л. де Бройль писал: **«В 1923 г. стало почти ясно, что теория Бора и старая теория квантов – лишь промежуточное звено между классическими представлениями и какими-то очень новыми взглядами, позволяющими глубже проникнуть в исследование квантовых явлений»**. Работа де Бройля явилась большим шагом вперед в развитии квантовой физики. Помимо того, что он выдвинул идею волновых свойств вещества, де Бройль впервые соединил квантовую физику со специальной теорией относительности (СТО), применив положения последней к выводу своей основной формулы.

В основу работы де Бройль положил два вариационных принципа: принцип Гамильтона из механики:

$$\delta \int L dt = 0$$

и оптический принцип Ферма:

$$\delta \int \frac{dS}{v} dt = 0 .$$

Первый из этих двух принципов утверждает, что свободная частица движется между двумя точками по наикратчайшему пути, при этом лагранжиан L принимает наименьшее (точнее, экстремальное) значение. Второй принцип, давно установленный в оптике, утверждает, что световой луч движется между двумя точками по такому пути, на который он затрачивает наименьшее время. Два интеграла, выражающие эти принципы математически, составляют стержень оптико-механической аналогии.

Де Бройль вводит в рассмотрение две инерциальных системы отсчета: неподвижная система K , относительно которой движется система K' . Пусть

частица массы m движется вместе с системой K' со скоростью v относительно K . Согласно де Бройлю, с частицей связана волна, которая в неподвижной системе K имеет вид

$$\psi = A \cos \omega_0 t_0.$$

В движущейся системе K' эта же волна будет записываться иначе:

$$\psi' = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{u} \right),$$

где u – фазовая скорость волны.

С учетом положений СТО, так как в системе K' частица покоится, очевидно, что фаза волны есть величина инвариантная, т. е.

$$\omega_0 t_0 = \omega \left(t - \frac{x}{u} \right).$$

Воспользовавшись релятивистским преобразованием Лоренца для времени:

$$t_0 = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \beta \left(t - \frac{vx}{c^2} \right), \text{ где } \beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

инвариантность фазы можно представить в виде:

$$\omega_0 \beta \left(t - \frac{vx}{c^2} \right) = \omega \left(t - \frac{x}{u} \right).$$

Отсюда, с учетом формулы релятивистского преобразования частоты $\omega = \omega_0 \beta$, находим:

$$\frac{vx}{c^2} = \frac{x}{u}.$$

Так как фазовая скорость волны $u = c^2/v$, следовательно, длина волны, отвечающей частице («дебройлевская длина волны»), равна:

$$\lambda = \frac{2\pi u}{\omega} = \frac{2\pi c^2}{\omega v} = \frac{2\pi c^2 \hbar}{mv c^2} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}. \quad (21)$$

Эта формула и дает дебройлевскую длину волны, связанную с движущейся частицей.

Для фазовой скорости дебройлевской волны можем записать

$$u = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{K} = \frac{\hbar\omega}{\hbar K} = \frac{mc}{p} = \frac{c}{v},$$

где $K=2\pi/\lambda$ – волновое число.

Тот факт, что фазовая скорость волны превышает скорость света в вакууме, не противоречит СТО, т. к. фазовая скорость есть чисто математическое понятие, она не связана с переносом какой – либо энергии или информации.

Л. де Бройль указывает на ряд свойств волны, связанной с частицей:

1) На круговой орбите радиуса r электрона в атоме «укладывается» целое число n дебройлевских длин волн: Другим словами, электрон в атоме в заданном состоянии как бы «настраивается» на определенную орбиту. Отсюда:

$$pr = \frac{nh}{2\pi} = n\hbar,$$

т.е. получается боровское правило квантования для момента импульса электрона на орбите.

2) Найдем групповую скорость дебройлевской волны. Групповой скоростью называют скорость распространения максимума амплитуды, или энергии волны. Релей показал, что групповая скорость $v_g = d\omega/dk$.

Тогда можно записать :

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(\hbar\omega)}{d(\hbar k)} = \frac{dE}{dp}.$$

С учетом релятивистского соотношения

$$p = \frac{E}{u}$$

можно вычислить групповую скорость дебройлевской волны:

$$v_g = \frac{d(pu)}{dp} = u.$$

Т.о., групповая скорость волн де Бройля совпадает со скоростью частицы.

Заметим, что дебройлевская длина волны, отвечающая частице вещества,

аналогична длине волны, отвечающей частице света – фотону. В самом деле, для фотона можем записать:

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \text{ или } \lambda = \frac{h}{p},$$

т. е. то же самое выражение (21), что и для электрона.

В 1927 г. два американских физика экспериментатора, К. Дж. Дэвиссон и Л. Х. Джермер, работавшие в лабораториях фирмы Bell Telephone, поставили опыт по проверке формулы де Бройля (21). В этих



Рисунок 10 – Схема опыта Дэвиссона и Джермера

опытах они опирались на результаты, полученные в Германии М. фон Лауэ и П. Дебаем еще в 1912 году (Лауэ изучал рассеяние рентгеновских лучей на монокристаллах, Дебай – на поликристаллах). Дэвиссон и Джермер, в отличие от своих немецких предшественников, не ставили задачу измерить длину волны, связанной с электронами (в их экспериментах пучок электронов падал на кристалл вместо рентгеновских лучей в опытах Лауэ), их задачей было – подтвердить справедливость формулы де Бройля (21). Это задача была успешно выполнена; однако к тому времени в правоте де Бройля уже никто не сомневался. В опытах Дэвиссона и Джермера применялся электронный пучок, но формула (21), вообще говоря, относится к одиночной частице. Прямой эксперимент по проверке этого утверждения был осуществлен в Москве в 1949 г. В. А. Фабрикантом и его сотрудниками Л. М. Биберманом и Н. Г. Сушкиным. В их опытах наблюдалась дифракция одиночных, летящих друг за другом электронов, когда отсутствует какое – либо взаимодействие между электронами в пучке. Опыты проводились на электронном микроскопе с использованием пучков электронов очень малой интенсивности. Эти опыты показали, что в итоге на экране все равно образуются дифракционные кольца, т. е. волновыми

свойствами обладает каждый отдельно взятый электрон.

С корпускулярно-волновым дуализмом, присущим микрочастицам, тесно связаны т. н. **соотношения неопределенностей**. В 1927 г. немецкий физик – теоретик Вернер Гайзенберг (1901 – 1976) в статье «О наглядном содержании квантовой кинематики и механики» сформулировал принцип, утверждающий, что реальный смысл имеют лишь те величины, для измерения которых существует определенный способ, или рецепт, измерения. Так, в классической физике теоретически предполагалось, что физические процессы не зависят от условий их наблюдения, и не было надобности учитывать воздействие измерительного прибора на измеряемый объект. В квантовой механике в этом отношении ситуация принципиально иная. Как показал В. Гайзенберг, для одного и того же момента времени нельзя предсказать точные значения координаты и импульса микрообъекта. Малая длина волны, благоприятная для точного измерения положения частицы, оказывается неблагоприятной для точного измерения ее импульса. Например, если вдоль прямой движется электрон с заданной скоростью, то для определения его положения мы можем осветить его сходящимся пучком света. Изображение пучка будет обладать размерами порядка длины волны света. Местоположение электрона можно уточнить, уменьшая эту длину волны. Однако, когда мы освещаем электрон, происходит взаимодействие со светом; при этом электрон приобретает дополнительный импульс, т. е. его скорость изменяется. Чем меньше длина волны, освещающая электрон, тем точнее мы определяем положение последнего, но тем больше при этом меняются его скорость и импульс.

В. Гайзенберг установил соотношения:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar, \Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar, \Delta z \cdot \Delta p_z \geq \hbar, \Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$$

где $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – неопределенности в координатах частицы; $\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$ – неопределенности в составляющих ее импульса. Были установлены также аналогичные соотношения между неопределенностями энергии и времени; между неопределенностью в угле поворота системы вокруг оси и неопределенностью проекции момента импульса на эту ось, и т. д.

Анализ показал, что невозможность точного измерения есть следствие того, что микрочастица по самой своей природе не допускает одновременной локализации в координатном и импульсном пространстве. Другими словами, эта невозможность есть следствие корпускулярно-волнового дуализма микрочастиц. Соотношения неопределенностей, в частности, требуют, чтобы квантовый гармонический осциллятор, даже находясь в наинизшем по энергии состоянии, не мог покоиться в положении равновесия, – в противном случае его координата и импульс одновременно имели бы точные значения. Это означает, что атомы в кристалле не могут покоиться в узлах решетки даже при абсолютном нуле температур: они вынуждены «беспрерывно дрожать». Рентгенограммы кристаллов, охлажденных практически до абсолютного нуля температур, оказываются из-за этого размытыми, и данный факт служит прямым экспериментальным подтверждением соотношений неопределенностей.

§ 2. 5 Роль Э. Шредингера в создании квантовой механики. Уравнение Шредингера. Работы В. Гайзенберга и М. Борна

Одной из главных проблем квантовой теории является отыскание ее основного уравнения, аналогичного уравнению Ньютона в классической механике. Последнее, как известно, позволяет для микроскопических тел решать основную задачу механики – по заданным силам, действующим на тело или систему тел, и начальным условиям (начальным значениям координат и скорости тела) определять координаты тела и его скорость для любого момента времени, т. е. описать движение тела в пространстве и во времени.

При постановке аналогичной задачи в квантовой механике необходимо с самого начала учитывать присущий микрочастицам корпускулярно-волновой дуализм, который ограничивает возможность применения к ним классических понятий координаты и скорости (или импульса). Вероятностное (статистическое) истолкование волн де Бройля и соотношения неопределенностей Гайзенберга указывают, что искомое уравнение в квантовой

механике должно быть таким, чтобы оно позволяло объяснить наблюдаемые на опыте волновые свойства частиц.

Основное уравнение нерелятивистской квантовой механики было получено в 1926 г. австрийским физиком Эрвином Шредингером (1887 – 1961). Как и уравнение Ньютона, являющееся обобщением многочисленных опытных фактов и потому невыводимое, уравнение Шредингера носит постулативный характер. Справедливость уравнения Шредингера доказывается тем, что выводы, получаемые с его помощью для многочисленных явлений атомной и ядерной физики, находятся в хорошем согласии с экспериментом. Концепция Шредингера явилась дальнейшим обобщением идей де Бройля. Если де Бройль сопоставил механический вариационный принцип с основным принципом геометрической оптики, то Шредингер провел последовательную аналогию между механикой и принципом Гюйгенса. Фактически уравнение Шредингера является аналогом уравнения Гамильтона – Якоби классической аналитической механики.

В 1929 г. Шредингер получил для введенной им ψ -функции уравнение вида:

$$\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0,$$

называемое стационарным уравнением Шредингера. Здесь E и U – полная и потенциальная энергия частицы соответственно; m – масса частицы. Сама ψ -функция была введена из оптико-механической аналогии и связана с действием S классической механики соотношением:

$$\ln \psi = \frac{S}{\hbar}.$$

Стремление Шредингера дать «наглядное» толкование волновой функции и волновой механики в целом не увенчалось успехом. В. Гайзенберг, присутствовавший в июле 1926 г. на докладе Шредингера, писал: *«Впервые познакомившись с толкованием, которое Шредингер хотел дать своему математическому дуализму – волновой механике, я пришел в совершенное*

отчаяние при мысли о той путанице в понятиях, которая, по-моему, была бы внесена в атомную теорию в результате такого толкования. К сожалению, из моей попытки навести порядок в понятиях во время дискуссии ничего не получилось». Сам Гайзенберг пошел по пути, совершенно отличному от того, что избрал Шредингер. Еще в 1925 г. Гайзенберг пришел к выводу о том, что необходимо отказаться от каких-либо модельных представлений. Он стремился заменить «ненаблюдаемые» электронные орбиты величинами, наблюдаемыми спектроскопически. Гайзенберг стремился сформулировать условия того, как по наблюдаемым характеристикам состояний находить вероятности перехода из одного состояния в другое.

Учитель В. Гайзенберга М. Борн обратил внимание на то, что адекватным математическим аппаратом для выражения идей Гайзенберга могло бы служить матричное исчисление. Позднее Гайзенберг писал: *«Я считаю очень важным подчеркнуть великую, но не всегда достаточно оцениваемую в печати заслугу Борна и Иордана в математическом обосновании квантовой теории. В работах Борна и Иордана матричная механика впервые стала законченной математической системой*». Матричный вариант квантовой теории был, таким образом, разработан М. Борном, Гайзенбергом и Иорданом в 1925-26 годах (и независимо от них – английским физиком-теоретиком Полем Адриеном Морисом Дираком (1902-1984). Борн и Винер (американский математик основоположник кибернетики) разработали специальную технику для формулирования и решения квантовомеханических задач – технику, основанную на использовании линейных эрмитовых операторов.

В отношении смысла самой ψ -функции Шредингер получил, что она, как и волновая механика в целом, позволяет отказаться от «картины частиц» и рассматривать непрерывные распределения плотности квадрата модуля ψ -функции. Иной была точка зрения М. Борна. Руководствуясь идеей Эйнштейна, интерпретирующего квадрат амплитуды световой волны как плотности вероятности появления фотонов, Борн распространил эту идею и на ψ -функции: он предложил трактовать $|\psi|^2$ как плотность вероятности нахождения

частицы в данной точке пространства.

Поначалу казалось, что матричная механика Гайзенберга и волновая механика Шредингера – две независимые и различные теории. Но вскоре самим Шредингером была доказана эквивалентность обоих подходов и их математических методов.

В 1925 г., опираясь на ряд фактов, не укладывающихся в рамки квантовой механики Шредингера, голландские физики С. Гаудсмит и Дж. Уленбек высказали гипотезу о наличии у электрона спина – дополнительной внутренней степени свободы. Пришлось допустить, что электрон обладает собственным механическим моментом импульса, который, однако, не удалось связать с каким-либо вращением, вроде обращения электрона вокруг своей оси. Спин – это характеристика самого электрона, наподобие массы или электрического заряда, и не имеет классического аналога. Выяснилось, что спин есть и у других частиц, причем все имеющиеся в природе элементарные частицы делятся на две группы: у одних спин полуцелый (как у электрона или нуклона), у других – целый (как у фотона). Швейцарский физик-теоретик Вольфганг Паули (1900-1958) показал, что частицам с полуцелым спином присуще следующее свойство: если в каком-либо квантовом состоянии уже имеется одна частица, то вероятность того, что в это же состояние попадет еще одна такая же частица, равна нулю. Это утверждение получило название «принцип запрета Паули». В то же время частицам с целым спином, наоборот, свойственно «чувство коллективизма»: такие частицы охотно заполняют квантовые состояния в каких угодно количествах.

Позднее для квантового идеального газа были построены две различные статистики. Статистическое распределение для газа из частиц с полуцелым спином было получено в 1926 г. Э. Ферми и П. Дираком, для частиц с целым спином – Ш. Бозе и А. Эйнштейном.

Глава 3 Создание теории относительности

§ 3. 1. Предпосылки к созданию СТО. Принцип относительности и электродинамика

Теория относительности возникла не на пустом месте, а зародилась в недрах классической физики, которая оказалась неспособной объяснить целый круг физических явлений. Все они концентрировались вокруг проблемы распространения света в движущихся средах, а с общетеоретической точки зрения – вокруг вопроса о справедливости принципа относительности в электродинамике.

Безусловно, первым шагом на пути к созданию теории относительности и одним из основных положений классической механики является принцип относительности Галилея. Он, в частности, утверждает, что с точки зрения механических явлений не существует выделенной («привилегированной») инерциальной системы отсчета (ИСО): все такие системы отсчета равноправны. На вопрос: почему Галилей ограничил свой принцип только механикой? – следует ответить, что во время Галилея ничего того, что мы называем «другими разделами физики», просто не существовало, и механика практически представляла собой всю физику. Кроме того, едва ли не до конца XIX века ученые пытались все физические явления объяснить на основе механических моделей, так что галилеевский принцип относительности действительно охватывал собой «всю физику».

Принцип относительности Галилея мог быть выражен в математической форме после того, как Ньютон записал свои уравнения механики (1687 г.). Так как основными переменными в этих уравнениях служат координаты и время, то для преобразования уравнений механики при переходе от одной системы отсчета к другой, движущейся относительно первой, необходимы формулы преобразования координат и времени, отвечающие такому переходу. Из

принципа относительности Галилея вытекало, что соответствующее преобразование координат и времени должно оставлять форму законов Ньютона неизменной.

В конце 60-х – начале 70-х годов XIX века была построена новая фундаментальная физическая теория – электродинамика Дж. К. Максвелла. Принципиальная новизна этой теории заключалась в первую очередь в том, что Максвелл, следуя идеям Фарадея, придерживался концепции близкодействия, тесно связанной с понятием поля. В электродинамике Максвелла взаимодействие передавалось с конечной скоростью – скоростью распространения поля. Теория давала вполне определенное значение для этой скорости; в частности, в вакууме скорость распространения электромагнитного поля c выражалась через электрическую постоянную ϵ_0 и магнитную постоянную μ_0 по формуле:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}.$$

Возникает естественный вопрос: справедлив ли принцип относительности в электродинамике? Другими словами, являются ли уравнения Максвелла ковариантными (т. е. сохраняющими свою форму) по отношению к преобразованиям Галилея? Нетрудно убедиться, что ответ на этот вопрос отрицательный: преобразования Галилея меняют вид уравнений Максвелла. Тогда появляется подозрение, что принцип относительности на электродинамику не распространяется.

Из уравнений Максвелла, однако, неясно, в какой системе отсчета электромагнитные волны в вакууме движутся со скоростью c . Естественно было бы считать, что – в любой ИСО. Однако такое предположение противоречит классическому закону сложения скоростей, т. е. преобразованиям Галилея. А так как последнее считалось в XIX веке самоочевидным, то практически все физики явно или неявно придерживались точки зрения самого Максвелла, который полагал, что уравнения для электромагнитного поля (уравнения Максвелла) формулируются в системе отсчета, связанной с эфиром

– особой средой, выступающей в качестве материального носителя всех электромагнитных (а значит, и оптических) явлений. Именно в этой системе отсчета величина скорости света равна электродинамической постоянной c . В любой другой ИСО скорость света будет складываться по закону сложения скоростей со скоростью источника относительно эфира, т. е. уже не будет по модулю равна c . Таким образом ИСО, связанная с эфиром, оказывается выделенной и может претендовать на роль абсолютной системы отсчета. Это значит, что принцип относительности в электродинамике несправедлив.

Однако принцип относительности в электродинамике можно было попытаться сохранить даже в рамках традиционных для того времени представлений. Существовали две возможных модели поведения эфира по отношению к движущимся к сквозь него телам: 1) эфир может полностью увлекаться ими; 2) он может оставаться неподвижным. Две эти альтернативы вызвали в конце XIX века резкий подъем интереса к проблеме распространения света в движущихся средах. Остановимся на этом вопросе подробнее.

1. Немецкий физик Генрих Герц (1857 – 1894) предположил, что эфир полностью увлекается движущимися сквозь него телами. Это означает, что электродинамические явления аналогичны акустическим, которые мы наблюдаем, находясь в закрытом вагоне поезда.

В рамках этой гипотезы:

- а) принцип относительности универсален;
- б) ньютонова механика верна;
- в) уравнения Максвелла требуют модификации.

Таким образом, требовалось построить новую электродинамику, отличную от электродинамики Максвелла, что сам же Герц и сделал. Необходимые для проверки новой теории наблюдения были проведены задолго до Герца. Это, во-первых, наблюдение абберации света звезд (Дж. Брэдли, 1728 г.) и, во-вторых, опыт Физо (1851 г.), в котором луч света распространялся сквозь текущую воду вдоль и против ее течения. В обоих случаях было твердо установлено, что гипотеза полностью увлекаемого эфира противоречит опыту.

2. Гипотезу противоположного характера высказал голландский физик Хендрик Антон Лоренц (1853–1928). Согласно гипотезе Лоренца, эфир полностью неподвижен и не участвует в движении материальных тел. Электродинамические явления в этом случае аналогичны акустическим явлениям, которые мы наблюдаем, находясь на движущейся открытой платформе. Иными словами, согласно Лоренцу, должен существовать «эфирный ветер».

В данной схеме:

- а) принцип относительности в механике справедлив;
- б) принцип относительности в электродинамике несправедлив;
- в) уравнения Ньютона и уравнения Максвелла в вакууме – правильны, при этом последние формулируются в системе отсчета, связанной с эфиром.

Электродинамика

движущихся материальных сред, развитая Лоренцем, являлась частью созданной им электронной теории. Лоренц, в частности, показал, что для опытного подтверждения его гипотезы об «эфирном ветре» требуются измерения с точностью порядка v^2/c^2 .

Идею соответствующего эксперимента предложил еще Максвелл за год до

смерти, в 1878 г. Опыт, предложенный Максвеллом, был реализован американским экспериментатором Альбертом Майкельсоном (1852–1931). В опыте Майкельсона, проведенном в 1881 г. в Берлине, где Майкельсон

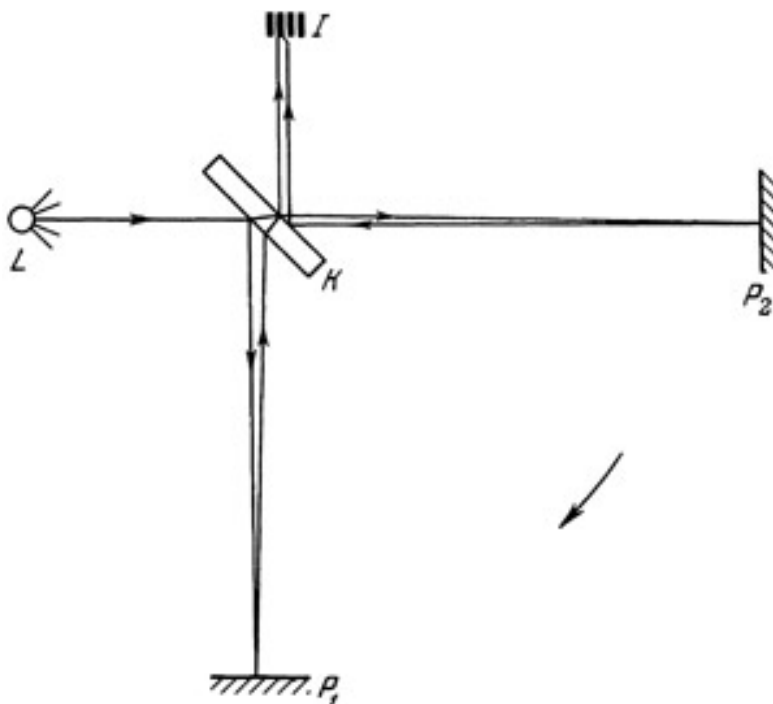


Рисунок 11 – Схема опыта Майкельсона. L – источник света, P1, P2 - зеркала, K – полупрозрачное зеркало, I – интерференционная картина

проходил стажировку у Г. Гельмгольца, свет от земного источника разделялся стеклянной пластинкой на два луча. На примерно одинаковых расстояниях от пластинки на пути отраженного и проходящего лучей и перпендикулярно к ним расположены два зеркала, отражающие свет обратно к пластинке. Если, как предполагалось, скорость света неодинакова в двух взаимно перпендикулярных направлениях, то между лучами должна возникнуть разность фаз и интерференционная картина сдвинется. Точность интерферометра Майкельсона была такой, что позволяла обнаружить «эфирный ветер» с точностью до 10 км/с, что втрое меньше скорости Земли на околосолнечной орбите. Однако никакого «эфирного ветра» обнаружено не было. Позднее, вернувшись в США, Майкельсон совместно с Морли в 1887 г. осуществил аналогичный эксперимент с точностью в 20 раз выше, но результат по-прежнему был отрицательным.

Заметим, что из полученного Майкельсоном результата, еще не следует, что эфира не существует: для такого радикального вывода стоит привлечь дополнительные опытные факты. Однако вне зависимости от того, существует эфир или нет, результат опыта Майкельсона означает, что скорость света *изотропна* в любой ИСО.

В итоге к концу XIX – началу XX веков в физике сложилась парадоксальная ситуация:

- а) явление аберрации говорит о полной неподвижности эфира;
- б) опыт Физо свидетельствует о частичном увлечении эфира;
- в) из опыта Майкельсона следует полная увлекаемость эфира.

Кроме того, единственные, казалось бы, альтернативы – теория Герца и теория Лоренца – оказались несостоятельными. Высказывалось множество предположений для преодоления этой ситуации. Укажем лишь два из них, наиболее важных с исторической и физической точек зрения.

3. Согласно *контракционной гипотезе* Лоренца-Фитцджеральда (1892 г.), концепция неподвижного эфира сохраняется, но считается, что тела, движущиеся в эфире, претерпевают сокращение размеров в направлении своего

движения

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

где l – продольный размер тела в неподвижной системе отсчета, относительно которой тело движется со скоростью v , l_0 – собственная длина тела (размер тела в системе отсчета, относительно которой оно покоится). Подчеркнем, что этому сокращению приписывался непосредственный, буквальный смысл. Лоренц объяснял его изменением электрических сил, действующих между частицами в движущемся теле, а затем предположил даже, что при движении относительно эфира электроны сплющиваются.

Контракционная гипотеза объяснила отрицательный результат опыта Макельсона, но она только для этого и была введена и выглядела чрезвычайно искусственно. Более того, позднее выяснилось, что эта гипотеза противоречит экспериментальным данным (заметим, что гипотеза Лоренца – Фитцджеральда отнюдь неравнозначна выводу СТО о сокращении предельных размеров движущихся тел: они имеют совершенно разный смысл, и ни один из результатов СТО экспериментальным данным не противоречит). Речь идет об опыте Кеннеди-Торндайка (1932 г.), в котором использовался разноплечный интерферометр и наряду с орбитальным движением Земли учитывалось также ее суточное вращение и движение Солнца. За счет этих движений интерференционная картина должна была бы изменяться с периодами в 12 часов и 6 месяцев, но ничего подобного не наблюдалось. Опыт Кеннеди-Торндайка можно интерпретировать как доказательство **инвариантности скорости света**, т. е. независимости ее значения от системы отсчета.

4. Несколько нарушив хронологию повествования, отметим, что уже после создания СТО выдвигались разного рода эмиссионные теории, в которых концепция эфира отвергалась, а свет трактовался как поток частиц, скорость которых зависит от движения источника и/или наблюдателя. В частности, согласно баллистической гипотезе В. Ритца (1908 г.)

$$\vec{c}' = \vec{c} + \vec{V},$$

т.е. скорость света \vec{c}' геометрически складывается из скорости света \vec{c} , испускаемого неподвижным источником, и из скорости \vec{V} движения самого источника относительно наблюдателя. Эта гипотеза сразу объясняет отрицательный результат опыта Майкельсона, а также аберрацию света и опыт Физо.

Однако, как показал в 1913 г. В. де Ситтер, гипотеза Ритца вступает в резкое противоречие с данными астрономических наблюдений над двойными звездами. Если бы была справедлива баллистическая гипотеза, то движение компонентов двойной звезды выглядело бы весьма странно. В принципе могло бы случиться даже так, что один и тот же компонент двойной звезды наблюдался бы одновременно в разных местах («звездные привидения»). Тем не менее, никаких аномалий в видимом движении компонентов двойных звезд обнаружено не было.

Вышеупомянутые опыты и наблюдения сыграли важную роль в становлении и упрочении основных концепций СТО (но не в ее создании, о чем подробнее будет сказано в следующем параграфе). Эпизодически аналогичные эксперименты повторяются и в наше время, с использованием самой современной аппаратуры, однако все без исключения результаты подтверждают выводы СТО.

§ 3.2 Создание СТО. Постулаты Эйнштейна

В 1905 г. в немецком научном журнале «Anallen der Physik» появилась статья Эйнштейна под названием «К электродинамике движущихся сред». В этой статье практически полностью была изложена специальная теория относительности, которая не только естественным образом объясняла результаты опытов Майкельсона, но и давала правильное, непротиворечивое истолкование всем известным механическим, электродинамическим и оптическим явлениям. При этом автору статьи пришлось коренным образом пересмотреть традиционные воззрения на некоторые фундаментальные

свойства пространства и времени, считавшиеся до этого самоочевидными.

Прежде всего Эйнштейн полностью отказался от гипотезы эфира и стал рассматривать само электромагнитное поле как особый вид материи, не нуждающийся ни в какой среде. Такой отказ вызван тем, что концепция эфира оказалась внутренне противоречивой и с ее помощью не удавалось согласовать результаты всего многообразия экспериментов по распространению света (о чем было подробно рассказано выше). Отбросив гипотезу эфира, Эйнштейн путем глубокого общезначимого анализа пришел к выводу о том, что два важнейших положения: частный принцип относительности (распространяемый не только на механические, но и на электродинамические явления) и принцип универсальности скорости света – находятся в согласии друг с другом. Однако при этом они решительно противостоят преобразованиям Галилея и вытекающему из этих преобразований классическому закону сложения скоростей. Поэтому Эйнштейн пошел на весьма революционный шаг: вопреки «самоочевидности» и «здравому смыслу» он отказался от преобразований Галилея, а тем самым – и от привычных взглядов на пространство и время. В итоге остались два фундаментальных утверждения, называемые обычно «постулатами Эйнштейна».

Постулат 1. (принцип относительности Эйнштейна):

Все физические законы ковариантны по отношению к преобразованиям перехода от одной ИСО к любой другой ИСО.

Постулат 2. (принцип постоянства скорости света):

В природе существует инвариантная конечная скорость – скорость света в вакууме c .

Заметим, что принцип относительности Эйнштейна априори не содержит никаких предположений о конкретном виде преобразований перехода от одной ИСО к другой. В СТО соответствующие преобразования, заменяющие преобразования Галилея, должны выводиться из основных постулатов, а не

формулироваться в виде самостоятельного положения.

Необходимые преобразования координат и времени были найдены Лоренцем в 1904 г., еще до создания СТО. Лоренц исходил из того факта, что преобразования Галилея меняют вид уравнений Максвелла, и получил другие преобразования, названные преобразованиями Лоренца, которые оставляют уравнения электродинамики ковариантными (а, следовательно, меняют форму уравнений ньютоновской механики!). Аналогичные преобразования получил и французский математик Пуанкаре. Однако, хотя работы Лоренца и Пуанкаре явились важным этапом на пути к созданию СТО, однако два этих ученых все же не сделали решающего шага: в их работах не содержалось, по выражению В. Паули, «**нового и глубокого понимания всей проблемы**», переосмысление в новом свете самих понятий пространства и времени, которое присутствовало в статье Эйнштейна. Именно поэтому создателем СТО следует считать А. Эйнштейна, отмечая в то же время и большой, серьезный вклад Лоренца и Пуанкаре.

Новые представления о пространстве и времени, нашедшие математическое выражение в преобразованиях Лоренца, привели к пересмотру основных уравнений ньютоновской механики. Эйнштейном была построена новая, релятивистская механика; при этом выявились принципиально

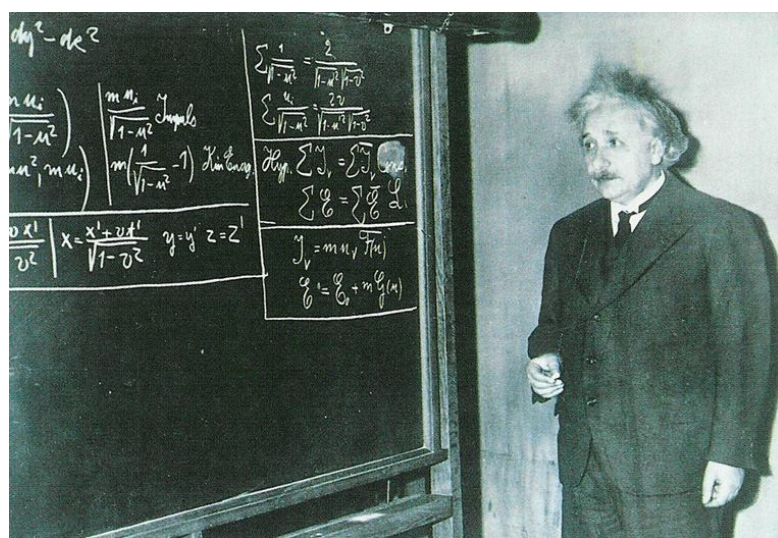


Рисунок 12 – А. Эйнштейн на лекции. Нобелевскую премию получил в 1921 г. за открытие закона фотоэффекта. Его фундаментальные труды в рамках СТО и ОТО Нобелевским комитетом пока не отмечены

новые, ранее неизвестные кинематические эффекты, такие как релятивистское сокращение длины, относительность одновременности, релятивистское замедление времени. Эйнштейн получил новую, релятивистскую формулу

сложения скоростей взамен прежней, классической:

$$v' = \frac{v + u}{1 + \frac{vu}{c^2}}.$$

Важно отметить, что для всех без исключения соотношений релятивистской кинематики выполняется принцип соответствия: в классическом пределе, когда $v, u \ll c$, преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея, а релятивистская формула сложения скоростей – в соответствующую классическую.

Следует отметить большой вклад в развитие математического аппарата СТО видного немецкого математика Германа Минковского (1864-1909 гг.). Минковскому принадлежит своеобразная геометрическая трактовка основных положений СТО, в основе которой лежит введенное им четырехмерное псевдоевклидово пространство (x, y, z, ict) . В этой трактовке математическим выражением постоянства скорости света служит утверждение об инвариантности четырехмерного интервала по отношению к преобразованиям Лоренца.

Важнейшим открытием релятивистской динамики в работе Эйнштейна явилось введение принципиально нового вида энергии – энергии покоя E_0 , связанной с массой тела знаменитым соотношением $E_0 = mc^2$, где m – масса тела (инвариантная характеристика, принципиально не зависящая от состояния его движения). Как показал Эйнштейн, при строго релятивистском подходе закон сохранения массы становится неверным; имеет место закон сохранения энергии в его наиболее общей форме, учитывающий и энергию покоя тел. Закон сохранения массы в его старом понимании справедлив лишь в нерелятивистском приближении.

В заключение параграфа остановимся на вопросе о том, какую роль сыграл результат опыта Майкельсона в создании СТО. Дело в том, что авторы многих учебников, где излагаются основы этой теории, придерживаются той точки зрения, что СТО возникла в результате попыток объяснения опыта Майкельсона и что этот опыт явился главной экспериментальной основой СТО.

В статье и высказываниях самого Эйнштейна до поры до времени не появлялось ничего такого, что противоречило бы общепринятой точке зрения на опыт Майкельсона как на исходный пункт построения СТО. Однако в статье американского историка науки Р. Шенкланда, опубликованной в 1963 г., приводится выдержка из записи его беседы с Эйнштейном в 1950 г.:

«Когда я поинтересовался, как он познакомился с опытом Майкельсона-Морли, он рассказал, что это произошло благодаря статьям Лоренца, но только после 1905 г. “Иначе, – сказал он, – я упомянул бы о нем в моей статье”».

Действительно, в уже упоминавшейся нами статье Эйнштейна 1905 г. нет упоминаний об опыте Майкельсона и нет ссылок на статьи Лоренца. Еще позже, в 1970-е годы, в Принстонском архиве Эйнштейна было обнаружено письмо Эйнштейна от 9 февраля 1954 г., содержащее еще более прямой и недвусмысленный ответ на рассматриваемый вопрос:

«Когда я развивал свою теорию, результат Майкельсона не оказал на меня заметного влияния. Я даже не могу припомнить, знал ли я о нем вообще, когда я писал свою первую работу по специальной теории относительности (1905 г.). Объяснить это можно просто тем, что, по общим соображениям, я был твердо убежден в том, что никакого абсолютного движения не существует, и моя задача состояла только в том, чтобы сочетать это обстоятельство с тем, что известно относительно электродинамики. Отсюда можно понять, почему в моей собственной деятельности опыт Майкельсона не играл никакой роли или, по крайней мере, не играл решающей роли».

Все сказанное, однако, не умаляет того огромного значения, которое имел опыт Майкельсона для развития физики. Сам Эйнштейн всюду подчеркивал красоту этого опыта и его фундаментальный вклад в науку. В одном из писем Эйнштейн говорит о том, что этот опыт

«укрепил мою уверенность в правильности принципа специальной теории относительности».

§ 3.3 Создание общей теории относительности (ОТО)

После 1905 г. Эйнштейн продолжил активно работать над развитием релятивистского подхода к физической картине мира в целом. Так, в 1907 г. выходит его большая статья «О принципе относительности и его следствиях». В этой статье впервые поставлен вопрос о применимости принципа относительности к системам, движущимся с ускорением относительно друг друга, и формулируется принцип эквивалентности гравитационных сил и сил инерции. Этот принцип утверждает полную физическую равноценность гравитационного поля и соответствующим образом подобранной ускоренной системы отсчета. Тем самым Эйнштейн сделал решительный шаг к дальнейшему развитию и обобщению теории относительности.

В этой же работе было рассмотрено влияние гравитационного поля на электромагнитные процессы, определено воздействие гравитационного поля на частоту излучаемого света, показано, что теорема о соотношении энергии и массы выполняется не только для

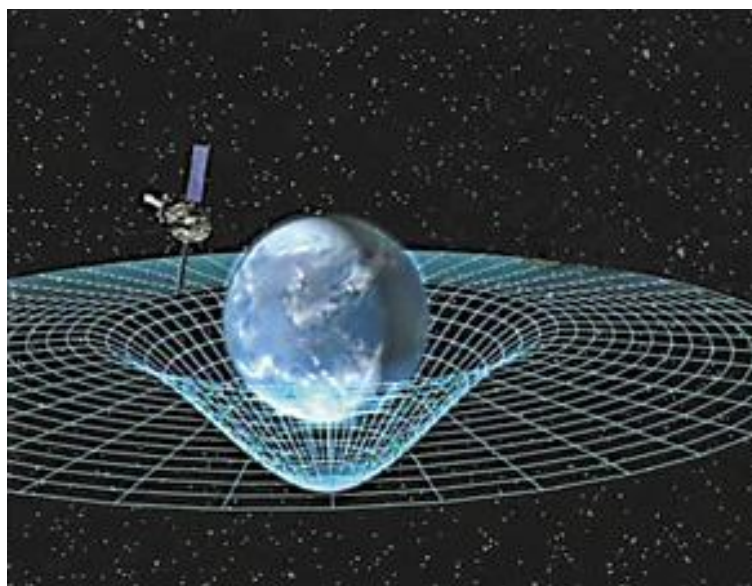


Рисунок 13 – Наглядное представление искривления двумерного пространства тяготеющей массой

инертной, но и для тяготеющей массы. В статье 1907 г. Эйнштейн показал, что если в некоторой точке с гравитационным потенциалом φ находятся часы, то они идут в $(1 + \varphi/c^2)$ быстрее таких же часов, находящихся в начале координат. Любой физический процесс протекает тем быстрее, чем больше гравитационный потенциал в той области, где протекает процесс. В частности,

как подсчитано в статье, свет, приходящий из источника, расположенного на поверхности Солнца, должен обладать длиной волны,

«приблизительно на две миллионных доли большей, чем, свет, испускаемый теми же атомами на Земле».

В 1911 г. в работе «О влиянии силы тяжести на распространение света» Эйнштейн вновь обращается к вопросу об эквивалентности постоянного гравитационного поля и равномерно ускоренной системы координат. Согласно Эйнштейну, наблюдатель, находящийся в неинерциальной системе отсчета, не в состоянии определить, движется ли он ускоренно или находится под действием поля тяготения. В этой работе Эйнштейн отказывается от постоянства скорости света в присутствии гравитационного поля. Он пишет: *«Если мы обозначим через c_0 скорость света в начале координат, то скорость света c в некотором месте с гравитационным потенциалом φ будет равна $c = c_0(1 + \varphi/c^2)$ ».*

Отсюда Эйнштейн приходит к выводу об искривлении лучей света в гравитационном поле и получает формулу для отклонения светового луча в поле тяготения Солнца.

В 1913 г. Эйнштейн публикует совместно с М. Гроссманом работу «Проект обобщенной теории относительности и теории тяготения». В ней сформулирована связь гравитационного поля с метрическим тензором q_{ik} , входящим в выражение для квадрата четырехмерного интервала

$$dS^2 = g_{ik} dx_i dx_k \quad (22)$$

Здесь элементы g_{ik} в общем случае являются функциями координат, а по индексам i и k подразумевается суммирование. Отличие метрики 4-пространства (22) от галилеевой

$$dS^2 = cd t^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2, \quad (23)$$

в соответствии с идеями Эйнштейна, можно отнести на счет наличия тяготения. В пространстве, свободном от гравитационных полей, элементы метрического тензора есть $g_{00}=c^2$, $g_{11}=g_{22}=g_{33}=1$, $g_{ik}=0$ (для $i \neq k$). Т.о. геометрические свойства

пространственно-временного континуума (метрика) не являются неизменными, а зависят от физических объектов (масс), находящихся в этом пространстве-времени. В теории относительности распределение массы характеризуется с помощью тензора энергии-импульса, в который плотность и давление входят как взаимосвязанные характеристики. В случае идеальной сплошной среды компоненты ковариантного тензора T_{ik} записываются в виде

$$T_{ik} = (\varepsilon + p)U^m U^n g_{mi} g_{nk} - p g_{ik} \quad (24)$$

Здесь $\varepsilon = \rho c^2$ – плотность энергии вещества, включая энергию покоя частиц, p – давление, U^m, U^n – 4-скорость, определяющая перенос импульса в соответствующих координатных направлениях. Тензор T_{ik} имеет 10 независимых компонентов, а его ковариантная 4-хмерная дивергенция равна нулю. В последнем свойстве проявляется релятивистское обобщение законов ньютоновой механики. Далее, в соответствии с основной гипотезой Эйнштейна, тяготение является следствием искривления пространства-времени, причем степень этого искривления определяется веществом, распределенным согласно тензору 2-го ранга T_{ik} (24). Отсюда следует, что и кривизна пространства-времени должна характеризоваться симметричным тензором 2-го ранга. Из геометрии известно, что степень искривления пространства с произвольным числом измерений описывается тензором Римана-Кристоффеля R_{iklm} 4-го ранга. Однако более детальный анализ привел Эйнштейна к выводу, что сам тензор R_{iklm} в основное уравнение теории входить не может, поскольку он имеет 20 независимых компонентов, тогда как имеется 10 независимых компонентов фундаментального метрического тензора g_{ik} .

В статье « Уравнения гравитационного поля » (1915 г.) Эйнштейн показал, что свойства 4-хмерного пространства – времени следует описывать тензором 2-го ранга G_{ik} , который является комбинацией тензора Риччи R_{ik} с инвариантом кривизны R :

$$\mathbf{G}_{ik} = \mathbf{R}_{ik} - \frac{1}{2} R \mathbf{g}_{ik}. \quad (25)$$

Тензор \mathbf{G}_{ik} принято называть тензором Эйнштейна, записанным в ковариантной форме. Как и для тензора \mathbf{T}_{ik} , ковариантная 4-дивергенция тензора \mathbf{G}_{ik} равна нулю. Поэтому Эйнштейн предположил, что между двумя этими тензорами существует линейная связь, и записал основное уравнение ОТО в виде

$$\mathbf{R}_{ik} - \frac{1}{2} R \mathbf{g}_{ik} = \chi \Phi_{ik}, \quad (26)$$

где $\chi = 8\pi G/c^4$ т. н. постоянная Эйнштейна.

Ее связь с гравитационной постоянной G была найдена из условия, что в случае слабых гравитационных полей ОТО переходит в теорию тяготения Ньютона.

Запись тензора \mathbf{R}_{ik} в явной форме сводит уравнение Эйнштейна к 6 независимым дифференциальным уравнениям 2-го порядка. Для каждого конкретного случая их решают следующим образом: в первую очередь, задают определенную функциональную форму для тензора \mathbf{T}_{ik} , например вида (24), а затем подбирают функции \mathbf{g}_{ik} так, чтобы выполнялось уравнение (26). Чаще всего такую задачу решают, значительно упрощая форму \mathbf{T}_{ik} и \mathbf{g}_{ik} , либо методом последовательных приближений.

Сразу после завершения ОТО, в 1916 г. немецкий астроном и физик Карл Шварцшильд (1873-1916) применил уравнение Эйнштейна (26) к исследованию свойств пространства–времени вблизи заданной массы M . Задача сводилась к интегрированию уравнений (26) при условии, что их правая часть равна нулю, поскольку в пустоте (в пространстве массы M) все компоненты тензора энергии-импульса $\mathbf{T}_{ik}=0$. На основе этого т. н. «внешнего» решения Шварцшильда был проведен анализ задачи Кеплера, т.е. исследовано движение материальной точки m вблизи центральной массы M (скажем, планеты вокруг Солнца) и закономерности распространения световых лучей вблизи массы M . Шварцшильд в своей работе вновь получил предсказанные Эйнштейном три

эффекта ОТО: 1) движение перигелиев планет; 2) отклонение световых лучей при прохождении вблизи гравитирующих масс; 3) красное смещение небесных светил. Этим эффектам, в особенности – их экспериментальному обнаружению, будет посвящен следующий параграф.

§ 3.4 Экспериментальная проверка общей теории относительности

1. Смещение перигелия Меркурия.

Меркурий является ближайшей к солнцу планетой и, согласно Кеплеру, движется вокруг солнца по эллиптической орбите. Уравнение орбиты имеет вид:

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \varphi},$$

где $p = a(1 + e^2)$ – параметр орбиты, a – большая полуось, e – эксцентриситет.

Как показал Эйнштейн, при учете релятивистских поправок уравнение траектории планеты несколько модифицируется:

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \left[\left(1 - \frac{3GM_0}{pc^2} \right) \varphi \right]}.$$

Следовательно, за каждый оборот планеты вокруг Солнца большая полуось ее эллиптической орбиты поворачивается в направлении движения на угол

$$\Delta\varphi = \frac{6G\pi M_0}{c^2 a(1 - e^2)}.$$

Отсюда ясно, что из всех планет Солнечной системы данный релятивистский эффект должен быть наиболее

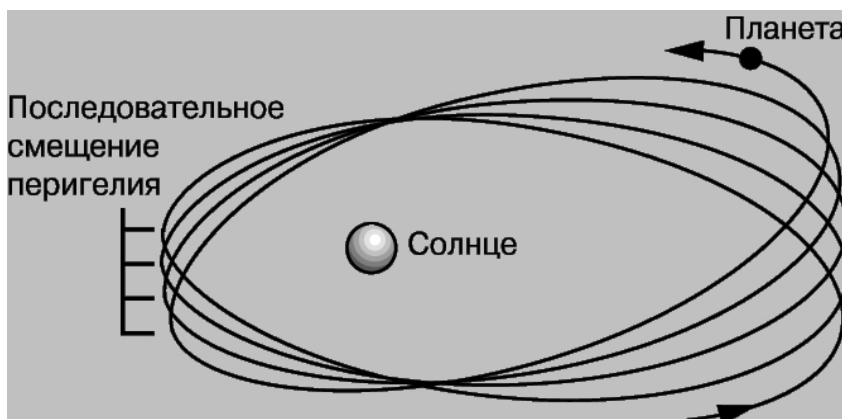


Рисунок 14 – Смещение перигелия планеты

сильным именно для Меркурия. Расчет показал, что релятивистское смещение перигелия Меркурия составляет приблизительно 43'' (угловых секунд) в столетие. Несмотря на то, что этот чрезвычайно слабый эффект «заслоняется» другими, гораздо более сильными, его все же удастся выделить на их фоне и надежно подтвердить с точностью до 0.1''.

2. Отклонение лучей света в поле тяжести.

В уже упоминавшейся работе 1907 г. Эйнштейн рассмотрел вопрос о влиянии тяготения на электромагнитные и оптические процессы. Он пришел к выводу, что влияние гравитационного поля Земли столь незначительно, что отсутствуют какие-либо перспективы для сравнения результатов его теории с опытом. Однако в его расчетах не учитывался эффект кривизны пространства. В 1911 г., в статье «О влиянии силы тяжести на распространение света», Эйнштейн вновь обращается к вопросу о влиянии тяготения на оптические процессы. Рассматриваются лучи света, проходящие вблизи Солнца: под влиянием солнечного тяготения эти лучи должны испытывать отклонение. В результате такого отклонения должно иметь место кажущееся увеличение углового расстояния между Солнцем и оказавшейся вблизи него звездой. Эйнштейн писал: *«Было бы крайне желательным, чтобы астрономы заинтересовались поставленным здесь вопросом даже и в том случае, если бы предыдущие рассуждения казались недостаточно обоснованными или фантастическими»*.

В 1916 г. в работе «Основы общей теории относительности» Эйнштейн, в отличие от своих предыдущих работ, учел кривизну пространства. Он установил, что световой луч, проходя вблизи шарообразного тела с массой M , отклоняется от прямолинейного пути на угол

$$\beta = \frac{6GM}{c^2 r},$$

где r – наименьшее расстояние до луча от центра тела. В частности, для Солнца получается

$$\beta = 1,75'' \frac{R_s}{r},$$

где R_s – радиус Солнца.

Отклонения
видимых положений
неподвижных звезд,
расположенных
«недалеко» от
Солнца, наблюдают

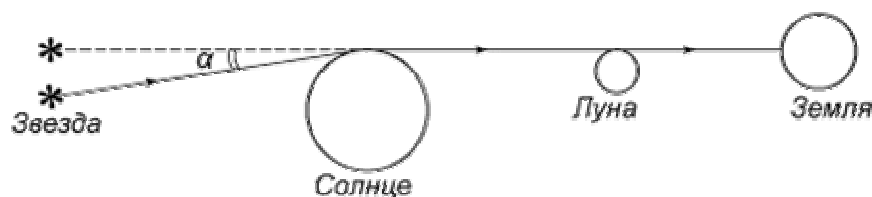


Рисунок 15 – Схема наблюдения смещения видимого положения звезды полем тяготения Солнца в момент солнечного затмения

во время полных солнечных затмений (во всякое другое время ярко светящееся Солнце не позволяет наблюдать ближайшие к нему звезды). Звезды которые находятся вблизи Солнца, фотографируются во время солнечного затмения и сравниваются с их же фотографией, когда Солнце находится в другой части неба. Положения звезд на фотографии, сделанной во время затмения, должны быть смещенными в радиальном направлении. Впервые этот эффект был надежно установлен в ходе наблюдения полного солнечного затмения 29 мая 1919 г., что явилось настоящим триумфом ОТО. Впоследствии аналогичные наблюдения были повторены неоднократно, и общий вывод таков: ОТО подтверждается с точностью до 10 – 20 %.

После открытия в 60-е годы XX века мощных внегалактических радиоисточников – квазаров – оказалось, что два из них находятся вблизи эклиптики и потому в своем видимом годичном перемещении на небесной сфере Солнца проходят вблизи них. Это позволило измерить отклонение радиоволн, проходящих вблизи Солнца. Результаты подтвердили предсказание Эйнштейна с точностью до 1 %. Еще один метод проверки этого эффекта – измерение запаздывания отраженного радиоимпульса, направленного на Меркурий, Венеру или Марс в моменты, когда для земного наблюдателя данная планета находится «почти за Солнцем». Этим методом в конце 60-х годов теория была подтверждена с точностью 0,2 %.

3. Гравитационное смещение спектральных линий.

Из общей теории относительности также следует, что спектральные линии света, испускаемого поверхностью тела массы M и радиуса R , смещаются в « красную » сторону на величину

$$\Delta\lambda = \frac{GM}{c^2 r} \lambda \quad (27)$$

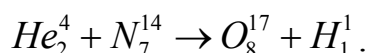
Для солнца при длине волны $\lambda=400$ нм эта формула дает $\Delta\lambda=0,08$ нм – величину, которую практически невозможно наблюдать на фоне других эффектов. Однако в спектрах белых карликов, радиусы которых в 50 – 100 раз меньше радиуса Солнца, эффект более ощутим. И все же точность здесь не превышает 10%, поскольку как радиус звезды, так и ее масса определяются со значительной погрешностью, а спектральные линии имеют довольно большое естественное уширение.

В последние десятилетия XX века для определения красного смещения в гравитационном поле Земли используются методы ядерной спектроскопии, основанные на эффекте Мессбауэра. Подобные измерения подтверждают формулу (27) с точностью до 1% (более подробно об этом будет сказано в §5.4).

Глава 4 Развитие физики атомного ядра и элементарных частиц

§ 4.1 Исследование свойств атомного ядра. Протонно-нейтронная модель. Ядерные силы

На протяжении двух десятилетий после открытия атомного ядра физики активно работали над изучением его свойств, и в частности, состава ядра. В 1919 г. Э. Резерфорд впервые осуществил искусственное превращение одного химического элемента в другой, а именно ядерную реакцию



Из этого он сделал вывод, что *«ядро атома азота распадается вследствие громадных сил, развивающихся при столкновении с быстрой альфа-частицей, и образующийся водородный атом является составной частью ядра азота»*.

Тем самым ядро водорода было возведено в ранг фундаментальной частицы, которую Резерфорд предложил называть протоном (от греческого «протос» – первый). Естественным образом возникла протонно-электронная модель ядра, согласно которой ядро состоит из протонов и электронов так, что суммарный положительный заряд ядра оказывается равным атомному номеру Z данного химического элемента.

К концу 20-х годов, однако, стала ясна несостоятельность этой модели. В частности, ей противоречило существование ядра азота N_7^{14} . Так, согласно протонно-электронной модели, это ядро должно состоять из 14 протонов и 7 электронов, т. е. из 21 частицы; следовательно, у ядра азота спин должен быть полуцелым. Опыт же показывает, что ядро N_7^{14} является бозоном (это противоречие получило название «азотной катастрофы»). Кроме того, общие соображения, основанные на квантовомеханическом принципе

неопределенности, приводили к однозначному выводу о том, что электрон не может входить в состав ядра.

Ситуация нашла свое разрешение в 1932 г., когда сотрудник Кавендишской лаборатории (руководимой в то время Э. Резерфордом) Джеймс Чедвик (1891–1974) открыл новую, нейтральную частицу, входящую в состав атомного ядра. Нейтрон – так стали называть вновь открытую частицу – обладал массой, примерно равной массе протона (точнее, нейтрон приблизительно на 0,14 % тяжелее, чем протон), и не имел электрического заряда.

Вскоре после открытия нейтрона сразу трое физиков: В. Гайзенберг, Д.Д. Иваненко, Э. Майорана – независимо друг от друга построили протонно-нейтронную модель ядра, принятую и по сегодняшний день. Согласно этой модели, любое ядро (кроме ядра водорода) состоит из Z протонов и $(A-Z)$ нейтронов, где A – массовое число ядра.

Основными видами радиоактивности являются альфа- и бета-распады ядер. Детальное изучение альфа-радиоактивности привело к установлению ряда любопытных закономерностей. Так, энергия альфа-частиц при распаде всех радиоактивных ядер (а таких более 200) лежит в довольно узких пределах: $4 \text{ МэВ} < E_\alpha < 9 \text{ МэВ}$, среднее значение порядка 6 МэВ. Для каждого ядра эта энергия имеет несколько конечных значений, т. е. энергетический спектр α -частиц обладает тонкой структурой, что означает дискретность энергетических уровней ядра.

В 1927 г. Э. Резерфорд провел серию опытов по рассеянию α -частиц тяжелыми радиоактивными ядрами. Из этих опытов выяснилось, что α -частицы с энергией 8,8

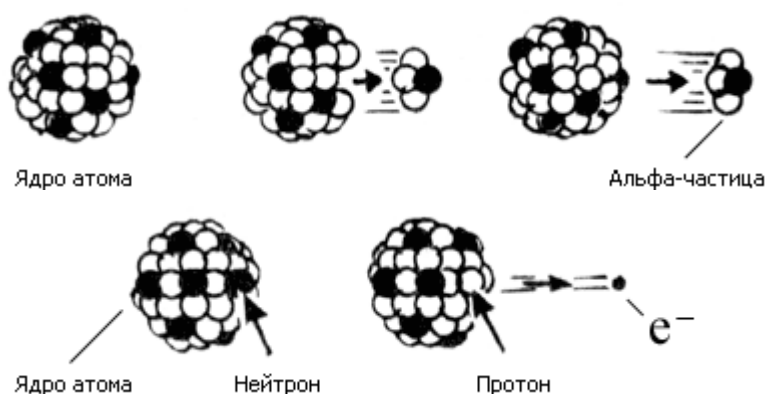


Рисунок 16 – Схема альфа-распада (вверху) и бета-распада (внизу) ядра атома

МэВ рассеиваются такими ядрами в строгом соответствии с законом Кулона, хотя испускаемые самими ядрами α -частицы обладают значительно меньшей энергией. Такой результат казался парадоксальным, поскольку он означал, что α -частицы с энергией, много меньше высоты потенциального барьера, тем не менее преодолевают этот барьер и покидают ядро.

Как показали в 1928 г. Г.А. Гамов и, независимо от него, Р. Герни и Э. Кондон, мы имеем здесь дело с квантовомеханическим тунельным эффектом. Этим объясняется и тот факт, что при довольно узком диапазоне изменения энергии E_α вылетающих α -частиц периоды полураспада α -радиоактивных ядер варьируются в чрезвычайно широких пределах. Причина этого в очень сильной (экспоненциальной) зависимости вероятности перехода от ширины и высоты барьера.

В отличие от α -распада, энергетический спектр β -распада непрерывен: кинетическая энергия вылетающих электронов лежит в пределах от нуля до некоторой максимальной величины E_m . Измерения показали, что E_m как раз соответствует разности масс начального и конечного ядер. Казалось, что энергия при β -распаде не сохраняется. Положение было настолько серьезным, что Н. Бор допускал возможность нарушения закона сохранения энергии при β -распаде.

Ситуацию разрешил В. Паули, введя в 1930 г. гипотезу о существовании новой нейтральной частицы с исчезающе малой массой. Э. Ферми (1901–1954) предложил для этой частицы название «нейтрино». Согласно Паули, β -распад есть результат взаимопревращения нуклонов:

$$n \rightarrow p + e^- + \nu_e; \quad p \rightarrow n + e^+ + \bar{\nu}_e.$$

Учитывая, что нейтрино в опытах по β -распаду зарегистрировано быть не могло, все трудности с якобы «несохранением» энергии исчезают. Позднее В. Паули показал, что спин нейтрино равен 1/2, как у электрона и нуклона.

В 1934 г. Э. Ферми, основываясь на гипотезе нейтрино, построил теорию β -распада, которую считал своей лучшей работой. (в 1938 году за эту теорию

Ферми был удостоен Нобелевской премии по физике). Ферми рассматривал β -распад как фундаментальный процесс, в котором нейтрон внутри или вне ядра спонтанно распадается на протон, электрон и нейтрино (точнее, антинейтрино). Теория Ферми позволила рассчитать эффективное сечение поглощения нейтрино в веществе; оказалось, что эта величина ничтожно мала. Именно поэтому нейтрино удалось впервые зарегистрировать на опыте только в 1953-56 годах (опыт провели американские экспериментаторы Ф. Райнес и К. Коуэн). Впоследствии выяснилось, что существует три различных вида нейтрино, которые могут с определенной вероятностью превращаться друг в друга (так называемые «нейтринные осцилляции»).

Как показали исследования, нуклоны в ядре удерживаются специфическими ядерными силами, имеющими радиус действия $R \sim 10^{-15}$ м и обладающими важным свойством насыщения. Последнее означает, что данный нуклон притягивает лишь определенное, небольшое число своих соседей. С другой стороны, известно, что свойством насыщения обладают и силы, ответственные за химическую связь в молекуле. Там притяжение между атомами сменяется на малых расстояниях их отталкиванием, причем эти эффекты определяются свойствами симметрии волновой функции по отношению к перестановке – «обмену» координат пар электронов. Поэтому соответствующие силы называют обменными. В свете сказанного возникает естественное предположение (впервые эту мысль высказал в 1932 году В. Гайзенберг), что и ядерные силы имеют обменный характер, по аналогии с молекулой H_2 .

В 1935 г. японский физик Хидэки Юкава (1907-1981), задавшись известными характеристиками ядерных сил (прежде всего, их радиусом действия), поставил вопрос: какими свойствами, и прежде всего – какой массой, должна обладать частица, переброс которой от нуклона к нуклону в ядре обуславливает эти силы. На первый взгляд кажется, что нуклон не может испустить или поглотить частицу, т.к. при этом нарушается закон сохранения энергии: частица уносит или приносит некоторую энергию ΔE , а нуклон

остается практически неизменным (это следует из закона сохранения импульса). Однако квантовомеханическое соотношение неопределенностей для времени и энергии

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar.$$

дает возможность как бы нарушить закон сохранения энергии на величину ΔE , если длительность процесса не превышает по времени Δt . Частица, которая испускается или поглощается при этом нуклоном, не может реально наблюдаться, т.е. является виртуальной частицей.

Согласно расчету Юкавы, виртуальная частица, которой обмениваются нуклоны при ядерном взаимодействии, должна обладать массой $m \sim (200-300) m_e$ т.е. быть примерно в 10 раз легче нуклона. Эту гипотетическую частицу, предсказанную Юкавой, стали называть мезоном. (по гречески «мезос» – средний, промежуточный). Мезон, согласно Юкаве, должен существовать и реально, активно при этом взаимодействуя с атомными ядрами. Из закона сохранения момента следует, что мезон должен обладать целым спином, а из свойства зарядовой независимости ядерных сил – что должны существовать три вида мезонов: положительный, отрицательный и нейтральный.

При последующем развитии физики элементарных частиц выяснилось, что концепция обменного механизма – универсальна, и в настоящее время считается, что он присущ всем фундаментальным взаимодействиям (более подробно об этом будет говориться в конце настоящей главы).

Поскольку, как уже отмечалось мезоны должны наблюдаться не только в виртуальном, но и в свободном состоянии, начались интенсивные поиски этих частиц. Их искали в космических лучах, ибо сколько-нибудь мощных ускорителей частиц в то время еще не было. В 1937 г. американские исследователи К. Андерсон и С. Неддермайер наблюдали частицу с массой $m \approx 207 m_e$; частицу называли « μ -мезоном». Однако более детальные исследования показали, что, несмотря на «правильное» значение массы, эти частицы никакого отношения к ядерным силам не имеют. Сегодня частицу, открытую в 1937 г. называют мюоном и не относят к классу мезонов.

В 1947 г. «мезон Юкавы» был все же обнаружен; это сделали С. Пауэлл и Дж. Оккиалини. Открытую ими частицу с массой $m \approx 270 m_e$ называли π -мезоном, или пионом.

§ 4.2 Работы по облучению ядер урана нейтронами. Открытие деления ядер урана

В 1934 г. Э. Ферми с сотрудниками в лаборатории Римского университета начал опыты по облучению нейтронами урана в надежде получить трансурановые (т.е. расположенные за ураном в периодической системе Д. И. Менделеева) элементы. Он действительно обнаружил β -излучение, причем весьма сложного состава, и сделал вывод о синтезе элемента с атомным номером $Z=93$ (впоследствии выяснилась ошибочность этого вывода). В 1937 г. в Берлине О. Ган, Л. Мейтнер и Ф. Штрассман продолжили опыты Ферми и, как им вначале казалось, подтвердили его выводы, хотя по ходу исследования возникли вопросы, не получившие ответа.

В 1938 г. И. Жолио-Кюри (дочь Марии и Пьера Кюри) и ее коллега П. Савич в Париже обнаружили среди продуктов облучения урана нейтронами радиоактивный элемент с химическими свойствами лантана. Они отождествили его с изотопом актиния, являющимся химическим аналогом лантана. В то же время было замечено, что новое вещество химически отделяется от актиния, но не отделяется от лантана. Однако решающих выводов из этого сделано не было.

Осенью того же 1938 г. О. Ган и Ф. Штрассман (многолетняя сотрудница О. Гана, физик Л. Мейтнер, к этому времени уже эмигрировала в Швецию, опасаясь преследований со стороны нацистов) повторили опыт французов, но, помимо лантана, обнаружили среди продуктов распада урана барий – химический аналог радия. После некоторых колебаний и многократных проверок О. Ган и Ф. Штрассман (оба по специальности – химики) приписали наблюдавшуюся активность именно лантану и барию, т.е. элементам,

расположенным в середине таблицы Менделеева. Как писал впоследствии О. Ган, *«это был совершенно неожиданный результат»*.

О. Ган в письме Л. Мейтнер в Стокгольм, где она в то время работала, подробно описал свои результаты и сомнения. Л. Мейтнер обсудила проблему со своим племянником О. Фришем – физиком, работавшим у Н. Бора в Копенгагене. Вдвоем Л. Мейтнер и О. Фриш теоретически обосновали результаты Гана и Штрассмана тем, что при захвате нейтрона ядро урана делится на два приблизительно равных по массе осколка. При этом выяснилось, что при делении ядра урана его части оказываются в сумме легче исходного ядра на $1/5$ массы протона. По формуле Эйнштейна $E_0 = mc^2$ это соответствует выделению энергии примерно в 200 МэВ.

О. Фриш, вернувшись в Копенгаген из Стокгольма, проверил свою догадку экспериментально, и выводы подтвердились. Он рассказал обо всем Н. Бору. Несколько дней спустя Н. Бор уехал в США и на заседании Американского физического общества (это был январь 1939 г.) доложил о работе Л. Мейтнер и О. Фриша. Некоторые физики тотчас же покинули заседание и через несколько часов экспериментально подтвердили

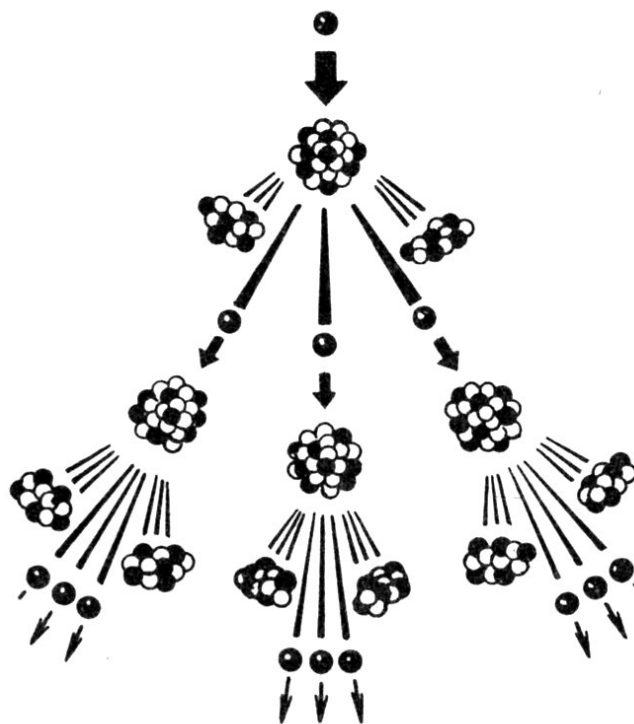


Рисунок 17 – Схема цепной ядерной реакции деления

предсказанное выделение энергии. Несколько дней спустя Э. Ферми (незадолго до этого эмигрировавший в США из фашистской Италии и работавший в университете в Чикаго) повторил опыты немецких ученых и подтвердил догадку о многообещающем делении ядер урана.

Спустя несколько недель Э. Ферми и Л. Сциллард окончательно

установили следующие чрезвычайно важные положения:

- а) атом урана можно расщепить на две части, при этом освобождается большое количество энергии;
- б) в процессе расщепления выделяется несколько вторичных нейтронов, которые, в свою очередь, могут расщепить другие ядра урана и вызвать цепную ядерную реакцию.

§ 4.3 Первый ядерный реактор. Создание атомной бомбы

В том же 1939 г. была подробно разработана теория деления тяжелых ядер. Основной вклад в ее разработку внесли советский физик Я.И. Френкель и, независимо от него, – Н. Бор, работавший с января по май 1939 г. в США. В 1940 г. советские физики-теоретики Юлий Борисович Харитон (1904–1996) и Яков Борисович Зельдович (1914–1987) теоретически исследовали цепную реакцию деления урана и сформулировали условия, необходимые для ядерного взрыва. Статья Харитона и Зельдовича оказалась последней открытой публикацией на эту тему: после нее исследования по ядерной энергетике как в нашей стране, так и на Западе были строго засекречены вплоть до 1956 г.

В ходе этих теоретических разработок была доказана, в частности, особая способность к расщеплению изотопа урана-235 и плутония. Оказалось, что наиболее распространенный в природе изотоп урана – уран-238 может быть активизирован (расщеплен) только быстрыми нейтронами с энергией не менее 1 МэВ. Такие нейтроны при делении урана хотя и высвобождаются, но эффективное сечение их взаимодействия с ядром урана-238 очень мало, и цепная реакция не идет. В то же время изотоп урана-235, как и плутоний, делится нейтронами любых энергий (правда, медленными гораздо эффективнее, чем быстрыми), однако содержание урана-235 в природном уране составляет всего 0,7 %.

Из этого затруднения были предложены два выхода.

Во-первых, – обогащение природного урана изотопом урана-235; тогда в

нем при определенных критических размерах возникает лавинообразная цепная реакция, что дает взрыв колоссальной силы. (Для сравнения: при распаде молекулы тринитротолуола, т.е. тротила, выделяется энергия около 10 эВ, а при распаде ядра урана – 200 МэВ, что в 20 миллионов раз больше).

Другой способ – ввести в естественную смесь изотопов урана замедлители нейтронов, например блоки из графита, которые уменьшают энергию нейтронов до таких величин, что цепная реакция деления станет возможной. В этом случае высвобождение энергии будет постепенным и управляемым.

Интенсификация работ по высвобождению ядерной энергии была предопределена ходом самой истории. К концу 30-х годов прошлого века всем стало ясно, что дело идет к мировой войне. В начале августа 1939 г. к А. Эйнштейну, жившему в маленьком университетском городке Принстон (штат Нью-Джерси) приехали трое молодых физиков, незадолго до того эмигрировавших в США из Венгрии, где у власти находился профашистский режим, – Э. Теллер, Ю. Вигнер и Л. Сциллард. Они сообщили Эйнштейну важную информацию о том, что ряд видных немецких физиков – К. фон Вайцзеккер, В. Гайзенберг, В. Боте и др. – активно работают над созданием оружия нового типа, в основе которого лежит высвобожденная при расщеплении ядер урана энергия.

Встревоженный Эйнштейн написал письмо президенту США Ф.Д. Рузвельту. В этом письме он указал на необходимость срочно начать работы по созданию атомного оружия. Письмо Эйнштейна было передано президенту 11 октября, уже после начала 2-ой мировой войны. Рузвельт, будучи весьма дальновидным государственным деятелем и убежденным антифашистом, дал поручение выделить необходимые средства и начать соответствующие работы.

Созданием первого ядерного реактора руководил Э. Ферми. «Урановый котел» строили в обстановке строжайшей секретности под трибунами стадиона Чикагского университета, он содержал около 46 т урана и 385 т графита. Котел имел форму эллипсоида, сооружение велось слой за слоем, без

предварительных чертежей. В специально просверленных каналах располагались бронзовые стержни, покрытые кадмием – активным поглотителем нейтронов. Измерения показали, что после укладки 57-го слоя масса урана станет критической. 2 декабря 1942 года впервые была осуществлена самоподдерживающаяся реакция, продолжавшаяся 28 минут, после чего реактор был заглушен.

Одновременно с созданием реактора полным ходом шли и другие работы, направленные на скорейшее создание атомной бомбы. Работы велись, по соображениям секретности, в нескольких удаленных друг от друга специально выстроенных «атомных городах». Так, в долине реки Теннесси возник город Ок-Ридж с 79 тысячами жителей. На предприятиях этого города из урановой руды получали уран-235 – заряд для атомной бомбы. В бесплодной пустыне на южном берегу реки Колумбия появился город Хенфорд, где уран-238 превращался в другое ядерное взрывчатое вещество – плутоний. Лаборатории, где должны были проводиться исследования по непосредственному созданию атомной бомбы, решено было построить в уединенном месте в штате Нью-Мексико, близ городка Лос-Аламос; стройка началась в ноябре 1942 г. Были построены сотни лабораторий, в которых занимались проблемами собственно бомбы, ее конструкции, расчетом критической массы и способами взрыва. Научным руководителем всех работ по созданию атомной бомбы был выдающийся американский физик Роберт Джулиус Оппенгеймер (1904–1967). Научным консультантом этого грандиозного предприятия, получившего кодовое название «Манхэттенский проект», был Нильс Бор.

Первая атомная бомба (в стационарном варианте) была готова к середине июля 1945 г. Для ее испытания было выбрано пустынное место в штате Нью-Мексико, в 450 км от Лос-Аламоса неподалеку от уединенной авиабазы Аламогордо. Намеченное к испытанию «изделие» получило кодовое наименование Trinity («Троица»). 12 июля на место испытания доставили на специально оборудованном армейском грузовике главную «деталь» атомной бомбы – плутониевый заряд. В центре полигона Аламогордо была сооружена

стальная башня высотой 30 метров и весом 32 тонны, вокруг которой на большом расстоянии разместили регистрирующую аппаратуру. В 9 км к югу, северу и востоку от башни глубоко под землей оборудовали три наблюдательных пункта. В 16 км от башни находился командный пункт, а в 30 км – базовый лагерь из которого ученые и военные могли наблюдать за взрывом. Испытание состоялось в 5 часов 30 минут утра 16 июля 1945 г. мощность этого первого в истории атомного взрыва составило 20 килотонн в тротиловом эквиваленте.

Боевая (приспособленная для доставки самолетом к цели) атомная бомба была готова к 31 июля 1945 г. Масса ее составила чуть более 5 тонн; взрыватель (обычный фугасный заряд) должен был сработать на высоте 500 метров над целью. В бомбе содержалось несколько килограммов расщепляющегося вещества.

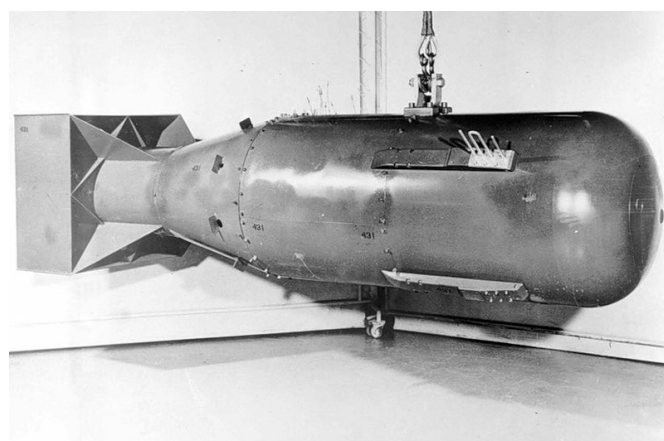


Рисунок 18 – Первая в мире атомная бомба «Fat Man» («Малыш»)

Новое оружие произвело большое впечатление на военных и политиков США и было активно использовано в дальнейших политических маневрах. К этому времени война в Европе уже закончилась полной победой стран антигитлеровской коалиции. Однако на тихоокеанском театре боевые действия не прекратились: императорская Япония, развязавшая войну против США, несмотря на разгром и капитуляцию своего главного союзника – гитлеровской Германии, продолжала оказывать сопротивление американско-британским военно-морским силам.

Желая окончить войну не прибегая к помощи СССР, а также продемонстрировать всему миру новое оружие, американское правительство приняло решение об атомной бомбардировке Японии. 6 и 9 августа 1945 г. атомные бомбы были сброшены на два крупных японских города – Хиросиму и

Нагасаки. С военной точки зрения это решение было весьма сомнительным, так как Япония к этому моменту уже потеряла все свои завоевания в Тихоокеанском регионе, практически лишилась военно-морского флота и авиации, а продолжение военных действий с ее стороны поддерживалось лишь упрямством японского военно-политического руководства. В этой ситуации огромные жертвы (более 250 тыс. человек) среди, в основном, гражданского населения и разрушение военной и гражданской инфраструктуры двух городов не стали определяющим доводом за капитуляцию. Япония продолжила ведение боевых действий, следовательно бомбардировка основной своей цели не достигла.

9 августа СССР объявил войну Японии и за три недели полностью разгромил японскую Квантунскую армию в Манчжурии. Находясь под угрозой повторения атомных ударов и перспективой двойного вторжения 2 сентября 1945 г. на борту американского линкора «Миссури», стоявшего на якоре в Токийском заливе, был подписан акт о полной и безоговорочной капитуляции Японии – тем самым была поставлена последняя точка во Второй мировой войне, самой кровопролитной за всю историю человечества.

Ряд крупных немецких физиков, таких как В. Гайзенберг, О. Ган, К. фон Вайцзеккер, В. Боте и др., остались в Германии и после прихода к власти нацистов. По заданию гитлеровского руководства ими велась интенсивная исследовательская работа с целью создания атомного оружия, однако по ряду причин технического и организационного характера немецким ученым не удалось добиться поставленной цели.

Иначе обстояло дело в СССР. Уже в 1942 г., в разгар войны, в Москве по поручению советского руководства создается сверхсекретная «Лаборатория № 2», возглавить которую было поручено видному физiku и организатору науки Игорю Васильевичу Курчатову (1903–1960 гг.). Перед Курчатовым и другими сотрудниками Лаборатории № 2 была поставлена задача: – В как можно более сжатые сроки изготовить оружие нового типа, основанное на использовании цепной реакции деления урана или плутония. Были срочно разведаны и начали

разрабатываться месторождения урана (Восточная Сибирь, Мангышлак). К концу 1944 г. был получен первый килограмм очищенного урана.

После окончания второй мировой войны согласно доктрине Трумэна властные круги США попытались активно использовать монополию на ядерное оружие как средство военно-политического давления на СССР. Это поставило перед последним задачу скорейшего разгрома этой монополии и создания собственной атомной бомбы.

25 декабря 1946 г. под руководством И. В. Курчатова впервые в Европе была осуществлена управляемая цепная



Рисунок 19 – Первый советский атомный реактор Ф-1. Работает и в настоящее время

реакция деления урана. В декабре 1947 г. удалось получить первый препарат плутония в весовых количествах. 29 августа 1949 г. на Семипалатинском полигоне было взорвано первое советское ядерное устройство.

Началась гонка ядерных вооружений – противостояние между СССР и США за превосходство в области ядерного оружия в период холодной войны. В течение холодной войны и некоторые другие страны занимались разработкой ядерного оружия, но ни одно государство не производило его в таких масштабах, в каких это делали две сверхдержавы. Печальной страницей в истории атомной гонки вооружений явились многочисленные испытания ядерных зарядов на открытом

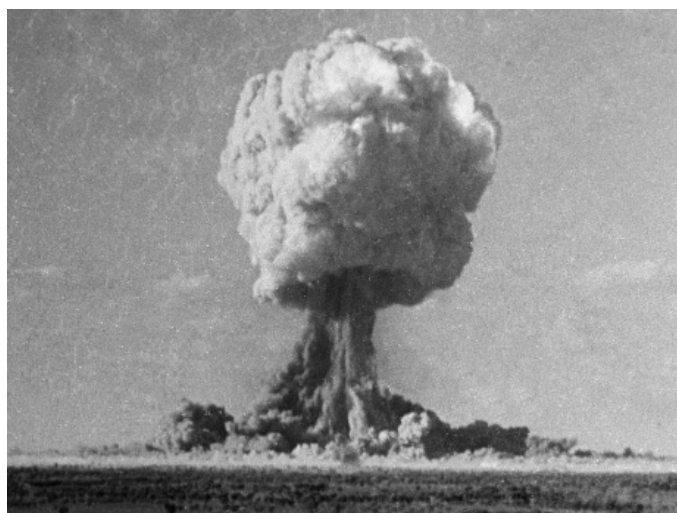


Рисунок 20 – Испытания первого советского атомного заряда в Семипалатинске

воздухе и военные учения с применением ядерных взрывов. Одно из таких учений было проведено 14 сентября 1954 г. в Тоцком районе Оренбургской области. В учениях принимали участие (и получили большую дозу радиоактивного облучения) около 45 тыс. военнослужащих. Пострадали также и десятки тысяч местных жителей (эвакуация была проведена лишь из пределов 15-километровой зоны от места взрыва, что было явно недостаточно). Учения в Тоцком проводились по инициативе и под непосредственным руководством министра обороны СССР, Маршала Советского Союза Г.К. Жукова.

Начиная с 50-х годов прошлого века ядерная энергия активно используется и в мирных целях. Наиболее распространенный способ такого ее использования – атомные электростанции (АЭС), где ядерный реактор, работая в управляемом режиме, служит источником тепла для нагрева циркулирующей воды, а та, в свою очередь, вращает турбины электрогенераторов. Ядерные реакторы применяют также в качестве двигателей для морских судов (ледоколов, подводных лодок), в атомных установках для опреснения морской воды и в ряде других случаев. В настоящее время атомная энергетика вносит весомый вклад в общее производство электроэнергии: ее доля в этом производстве составляет порядка 15-20 % (в среднем), при этом в отдельных странах (Франция, Япония) доля ядерной энергетики приближается к 40 %.

АЭС обладают неоспоримыми преимуществами перед другими способами производства электроэнергии: сравнительная дешевизна, малый расход «горючего», отсутствие выбросов продуктов «горения» в атмосферу и т.п. Однако эти преимущества во многом компенсируются рядом серьезных недостатков, к которым, в первую очередь, следует отнести наличие принципиально неуничтожимых радиоактивных отходов. Кроме того, огромную проблему представляет риск той или иной аварии на АЭС: ярким подтверждением тому служат крупные аварии на атомных электростанциях. Так авария 28 марта 1979 года на АЭС в Тримаял-Айленде (штат Пенсильвания) стала самой масштабной в США. Катастрофы на Чернобыльской АЭС (1986 г.) или на АЭС Фукусима-1 в Японии (2011 г.) еще

раз показали миру важность обеспечения безопасности атомных реакторов.

§ 4.4 Краткий обзор развития физики элементарных частиц

Важным этапом в теоретическом осмыслении механизма фундаментальных взаимодействий стало построение в 1948-49 г.г. квантовой электродинамики (КЭД). Авторами теории, независимо друг от друга, были американские физики Р. Фейнман и Дж. Швингер и их японский коллега С. Томонага. Методы расчета процессов, происходящих с участием электромагнитного взаимодействия разработанные авторами КЭД, сделали эту теорию одной из самых точных и изящных физических теорий. Метод перенормировок Томонага и Швингера и метод диаграмм Фейнмана позволили существенно упростить даже самые сложные электродинамические расчеты.

Происходило дальнейшее развитие теории атомного ядра, накопление и систематизация данных об элементарных частицах (к началу 60-х гг. было открыто уже несколько сотен новых частиц, большинство из которых были чрезвычайно короткоживущими – т.н. «резонансами»). После того, как П. Дирак в 1930 г. на основании квантово-релятивистских соображений предсказал существование позитрона, стало ясно, что у каждой частицы должен быть двойник – античастица. Позднее, по мере совершенствования ускорительной техники, были открыты на опыте: антипротон (Э. Сегре, 1955 г.), антинейтрон (Б. Корк и др., 1956 г.), целая группа антигиперонов. В 1965 г. Л. Ледерману с сотрудниками удалось впервые получить на опыте антидейтерий; в 1970 г. под руководством Ю.Д. Прокошкина в Серпухове был открыт антигелий.

В первой половине 50-х годов различными группами экспериментаторов (Й. Намбу, К. Нишиджима, Р. Арменгерос, А. Бонетти и др.) было открыто несколько новых сравнительно тяжелых частиц с довольно необычными свойствами: аномально долгим (порядка 10^{-10} с) временем жизни, парным (ассоциированным) рождением и т.д. Эти частицы получили наименование

«странных», а их необычное поведение удалось объяснить только после создания теории кварков в середине 60-х годов.

В 1956 г. американские теоретики китайского происхождения Т. Ли и Ч. Янг высказали весьма неординарную гипотезу о том, что в слабых взаимодействиях (тех, что происходят с участием нейтрино) может нарушаться четность. Видные физики, такие как В. Паули и Р. Фейнман, отвергали эту гипотезу. В частности, Фейнман заметил, что гипотеза о несохранении четности означает фундаментальное неравноправие левого и правого, но он не смог показать, как это предположение противоречит существующим экспериментальным данным. Ли и Янг для подтверждения своей гипотезы предложили идею опыта, где происходит β -распад ядер кобальта-60. Опыт был проведен в 1957 г. их соотечественницей Ц. Ву с сотрудниками в лаборатории Колумбийского университета. В опыте Ву ядра радиоактивного кобальта-60 ориентировались с помощью магнитного поля так, что спины всех ядер располагались в одном направлении. Радиоактивный препарат охлаждали до 0,1 К для того, чтобы тепловое движение не нарушало ориентации. При этих условиях было обнаружено, что электроны испускаются ядрами кобальта чаще в направлении спина ядра, чем в противоположном направлении. Любопытно, что незадолго до постановки этого опыта, в январе 1957 г., В. Паули писал В. Вайскопфу: **«Я не верю, чтобы Бог был «слабым левшой», и готов держать пари на большую сумму, что опыт даст симметричный результат»**. Опыт, однако дал асимметричный результат. В новом письме В. Паули говорит об этом так: **«...Начинаю приходить в себя после первого удара ... Это был удар не столько потому, что Господь Бог предпочитает левую руку, а потому, что Он, если нажать сильнее, соединяет левое и правое симметрично»**.

После открытия несохранения четности в слабых взаимодействиях Л.Д. Ландау и независимо от него Т. Ли и Ч. Янг высказали предположение о сохранении комбинированной четности. Оно состоит в том, что все процессы, включая слабые, симметричны при одновременном совершении трех преобразований: зарядового сопряжения, пространственной инверсии и

обращения времени (СРТ – теорема). Это свойство подтверждается всеми экспериментальными данными.

В течение 60-х годов в разных странах мира были построены новые, более мощные ускорители заряженных частиц. Так, в Брукхейвене близ Нью-Йорка вошел в строй ускоритель протонов с энергией 33 ГэВ; под Серпуховом заработал ускоритель протонов на 76 ГэВ; в Стэнфорде (штат Калифорния) был сооружен уникальный линейный ускоритель электронов SLAC с энергией в 22 ГэВ, и др. Все это привело к открытию многих новых частиц – векторных мезонов (мезонов с ненулевым спином), странных К-мезонов и т.д. Возникло разделение всех известных частиц на два класса: адроны – частицы, участвующие в сильном взаимодействии, и не участвующие в нем лептоны. При этом последних были считанные единицы, тогда как число известных адронов составляло несколько сот частиц и продолжало расти. Адроны, в свою очередь, подразделялись на барионы (полуцелый спин) и мезоны (целый спин).

Столь большое число известных адронов требовало их систематизации. Первые успехи в попытке как-то классифицировать эти частицы были достигнуты путем построения некоторых формальных симметрических структур. Для количественного описания свойств частиц были введены дополнительные характеристики, такие как изоспин, описывающий различные зарядовые состояния одной частицы (В. Гайзенберг); странность (М. Гелл-Манн); гиперзаряд и некоторые другие. В 1962 г. М. Гелл-Манн и Ю. Нееман предложили идею супермультиплетов, в которых адроны группировались по восьми квантовым числам («восьмеричный путь»). Таким образом, мезоны оказались сгруппированы в семейство из одной и восьми частиц, барионы – в семейство из одной, восьми и десяти частиц.

При таком подходе исключительно эффективным оказался математический аппарат теории групп, в котором каждому виду симметрии соответствует некоторая группа преобразований. Последней же, в свою очередь, отвечает определенный закон сохранения того или иного фундаментального параметра, описывающего внутреннее состояние

элементарной частицы. В частности, для адронов в теории Гелл-Манна комбинации квантовых чисел образуют группу симметрии $SU(3)$. На основании этого формализма М. Гелл-Манн предсказал существование новой частицы с «тройной» странностью – омега-минус гиперон. После того как предсказанная частица была в 1964 г. обнаружена экспериментально и имела в точности те свойства, какие ей приписывала теория, отпали все сомнения в правильности «восьмеричного пути». М. Гелл-Манн в 1969 г. был удостоен Нобелевской премии по физике.

Важнейшим результатом супермультиплетной классификации адронов, описываемой группой $SU(3)$, явилось построение в 1964 г. М. Гелл-Манном и независимо от него Дж. Цвайгом кварковой модели вещества. Ее суть в том, что в основе строения адронной материи лежат специфические фундаментальные частицы – кварки, образующие семейство из трех членов (u , d , s) со спином $1/2$. Все прочие квантовые числа у кварков трех названных типов («ароматов») различны. Наиболее удивительным оказалось то обстоятельство, что кварк должен был иметь дробный электрический заряд: заряд u -кварка равен $+2/3e$, а заряд d - и s -кварка – $(-1/3)e$, где e – величина элементарного заряда. Никогда до этого физике не приходилось иметь дело с зарядами, величина которых была бы меньше e .

Детальный анализ внутренней структуры адронов проводился параллельно теоретиками и экспериментаторами. Уже в 60-е годы тончайшими экспериментами удалось с достоверностью подтвердить наличие

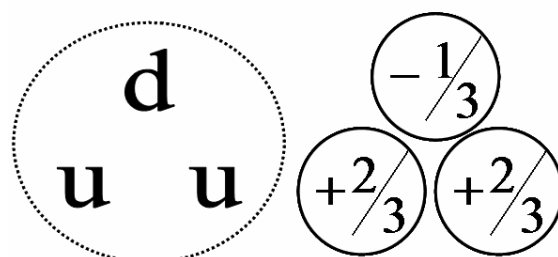


Рисунок 21 – Строение протона согласно КХД

внутри нуклона трех составных частиц, заряды и массы которых полностью соответствовали значениям, предсказанным моделью кварков. Однако все попытки наблюдать на опыте изолированный (свободный) кварк неизменно оканчивались неудачей. Впоследствии была построена теория межкварковых взаимодействий, получившая название **квантовой хромодинамики (КХД)**. В ее

основу был положен тот факт, что для описания всех наблюдаемых свойств адронов кварку, помимо «аромата», необходимо приписать еще одно квантовое число – «цвет». Как показали авторы КХД Й. Намбу, М. Гелл-Манн и С. Вайнберг, каждый кварк характеризуется одним из трех «цветов»: «красным», «зеленым» или «синим» (все названия условны, как и само слово «цвет» применительно к кваркам). «Цвет» представляет собой аналог заряда, определяющего межкварковое взаимодействие. Это взаимодействие, подобно другим фундаментальным взаимодействиям, носит обменный характер, квантами «цветового поля» являются *глюоны* – весьма специфические виртуальные частицы, каждая из которых, в силу особенностей «цветового» (межкваркового) взаимодействия, должна обладать одновременно двумя из трех возможных «цветов». (Отметим здесь, что реальные глюоны удалось косвенным образом наблюдать в 1979 г., когда на установке PETRA в Гамбурге были открыты т.н. глюонные струи, образующиеся в результате аннигиляции электронов и позитронов при высоких энергиях).

Согласно КХД, любой наблюдаемый на опыте адрон должен быть «белым», т.е. цвета входящих в его состав кварков должны полностью компенсировать друг друга. Поэтому наблюдать на опыте «цветную» частицу принципиально невозможно, в частности, нельзя зарегистрировать свободный кварк. Межкварковое взаимодействие обладает тем свойством, что сила притяжения между двумя кварками не уменьшается с расстоянием, и для того чтобы удалить эти кварки друг друга, необходимо затратить бесконечно большую энергию, что, разумеется, невозможно. Данное свойство получило название «конфайнмент» (пленение) кварков. В то же время в КХД показывается, что внутри адрона, на малых расстояниях (или, что то же самое, при высоких энергиях), кварки ведут себя как практически свободные частицы («асимптотическая свобода»). С точки зрения КХД, ядерные силы притяжения между нуклонами в ядре получили новое истолкование. Образно говоря, эти силы находятся в таком же отношении к межкварковому «цветовому» взаимодействию, как межмолекулярные силы Ван-дер-Ваальса – к

электромагнитным силам, действующим внутри молекулы. «Цветовое» межкварковое взаимодействие является наиболее мощным из всех фундаментальных взаимодействий.

Одновременно с развитием теории делались важные экспериментальные открытия. Так, в ноябре 1974 г. в двух лабораториях: Брукхейвене и Стэнфорде – было зарегистрировано рождение сверхтяжелого мезона, получившего двойное наименование J/ψ -частицы, или чармония. Выяснилось, что чармоний состоит из кварка нового типа – «очарованного» (charmed), или c -кварка, и его антикварка. Вслед за J/ψ -частицей были обнаружены и другие, в состав которых входил тяжелый c -кварк, как мезоны, так и «очарованные» барионы. В 1977 году группа экспериментаторов под руководством Л. Ледермана открыла в Колумбийском университете в Нью-Йорке т.н. Y -частицу (ипсилон-мезон), представляющую собой мезон из нового b -кварка («прелестного») и его антикварка, еще более тяжелого, чем c -кварк. В 1981 г. были зарегистрированы «прелестные» b -мезоны, в составе которых – кварк u (или d) и «прелестный» b -кварк. Наиболее тяжелый t -кварк (true – «истинный») был открыт в 1995 г.

В итоге возникла четкая схема из 12 фундаментальных фермионов, образующих три «поколения»:

$$\begin{bmatrix} u \\ d \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} \nu_e \\ e \end{bmatrix} - 1 \text{ поколение};$$

$$\begin{bmatrix} c \\ s \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{bmatrix} - 2 \text{ поколение};$$

$$\begin{bmatrix} t \\ b \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{bmatrix} - 3 \text{ поколение}.$$

В этой схеме отражена т. н. кварк-лептонная симметрия, когда каждая пара кварков тесно связана (через слабое взаимодействие) с определенной парой лептонов. По современным представлениям, вся имеющаяся во Вселенной материя построена из этих частиц как из «кирпичиков». Если к 12 фундаментальным фермионам добавить еще частицы-переносчики

фундаментальных взаимодействий (фотон, глюоны и т.п.), то будем иметь всю фундаментальную структуру материи.

В последние два десятилетия XX века в физике наметилась и получила развитие тенденция к объединению фундаментальных взаимодействий и, как следствие, – к уменьшению числа истинно фундаментальных сил. (Заметим, что первую, – хотя и не удавшуюся, – попытку такого объединения предпринял еще Эйнштейн, последние годы своей жизни посвятивший т.н. «единой теории поля»). В конце 70-х годов трем работавшим независимо друг от друга физикам-теоретикам: Ш. Глэшоу, С. Вайнбергу и А. Саламу удалось построить единую теорию электромагнитных и слабых сил. Предсказанные теоретиками проявления *электрослабого взаимодействия* полностью подтвердились на опыте.

Была построена также *теория Великого объединения*, согласно которой на очень малых расстояниях $r \sim 10^{-30}$ м (напомним, что минимальные расстояния, которые сегодня может измерить экспериментальная физика, имеют порядок 10^{-18}

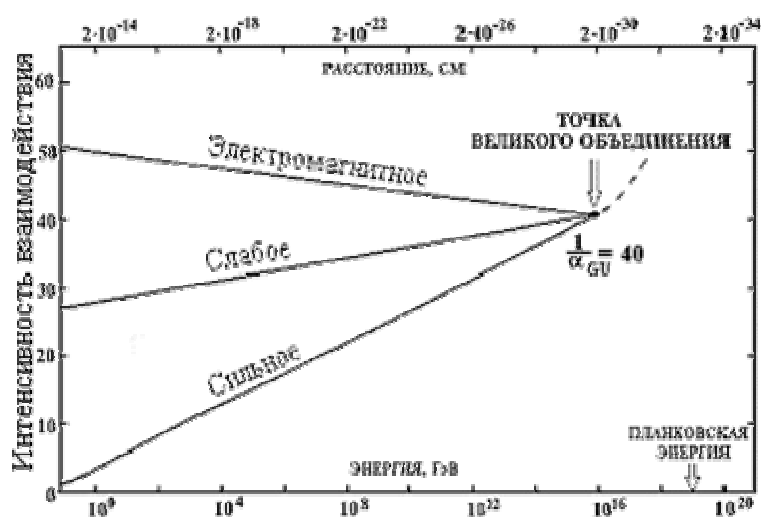


Рисунок 22 – Теория Великого объединения

м), т.е. при энергиях $E \sim 10^{14}$ ГэВ, все три вида взаимодействий – электромагнитное, слабое и сильное – должны стать одинаково эффективными, потерять свою «индивидуальность». Другими словами, при $E > 10^{14}$ ГэВ должно существовать единое Великое (универсальное) взаимодействие. Переносчиками такого взаимодействия, согласно теории, должны быть сверхтяжелые X- и Y-бозоны со столь большими массами, что для их регистрации потребовалось бы увеличить энергию современных ускорителей на 12 порядков. Следовательно, этот (прямой) путь проверки теории Великого объединения в ближайшем

будущем исключен. Остается только одно: попытаться проверить справедливость теоретических представлений с помощью процессов, происходивших на самых ранних этапах эволюции Вселенной, когда условия в ней отвечали энергиям $E > 10^{14}$ ГэВ. В частности, одним из следствий теории Великого объединения явилась бы нестабильность протона. Однако на данный момент все попытки экспериментаторов обнаружить распад протона ни к чему не привели. Во всяком случае, время жизни протона, по сегодняшним данным, не меньше 10^{31} лет (что на 21 порядок превышает время жизни нашей Вселенной).

Наконец, теоретически можно представить себе *суперобъединение* – объединение всех четырех фундаментальных взаимодействий, включая и гравитацию (употребляется также термин «суперсимметрия»). Анализ показывает, что из трех универсальных физических констант – скорости света c , постоянной Планка \hbar и гравитационной постоянной G – можно составить единственную комбинацию, имеющую размерность энергии:

$$E_P = \sqrt{\frac{c^5 \hbar}{G}} \approx 2 \cdot 10^9 \text{ Дж} = 10^{19} \text{ ГэВ}$$

(т.н. «планковская энергия»).

Эта величина еще на 5 порядков больше, чем энергия Великого объединения.

Глава 5 Физика твердого тела

Физика твердого тела (ФТТ) как наука родилась в начале XX века на базе атомной физики. Поскольку всякое твердое тело есть совокупность огромного числа атомов, т.е. ядер и электронов, свойства и взаимодействия которых между собой и с внешними полями обуславливают все бесконечное разнообразие свойств твердых тел, то главной задачей ФТТ является описание и объяснение их на атомном уровне. Адекватное же описание свойств атомов и электронов возможно лишь на основе квантовой механики и, в силу многочисленности частиц в твердом теле, только с привлечением закономерностей статической физики. Неудивительно поэтому, что ФТТ стала особенно бурно развиваться начиная с 30-х годов, после создания квантовой механики. Однако следует отметить, что целый ряд фундаментальных задач ФТТ удалось успешно решить и на основе представлений классической физики. Сюда относится вывод закона Ома, получение соотношения, связывающего электропроводность металла с его теплопроводностью (закон Видемана-Франца) и некоторые другие.

§ 5.1 Зонная теория и электрические свойства кристаллов. Школа А. Ф. Иоффе

Идею о наличии энергетических полос, или зон, в спектрах металлов впервые высказал в 1928 г. английский физик М. Стрэтт. Он исходил из того, что при объединении одинаковых атомов в кристалл металла каждый энергетический уровень атома, до этого многократно вырожденный, благодаря взаимодействию между атомами в кристалле расщепится на огромное число подуровней. Энергетический спектр в итоге будет представлять собой совокупность энергетических полос (зон), перемежающихся запрещенными зонами («энергетическими щелями»).

Детальную разработку основ зонной теории кристаллов осуществил в 1928–1930 гг. швейцарец Ф. Блох и француз Л. Бриллюэн. Ими было показано, что электропроводящие свойства кристалла всецело определяются его зонной картиной. Так, принадлежность кристалла к проводникам или диэлектрикам связана с наличием (или,

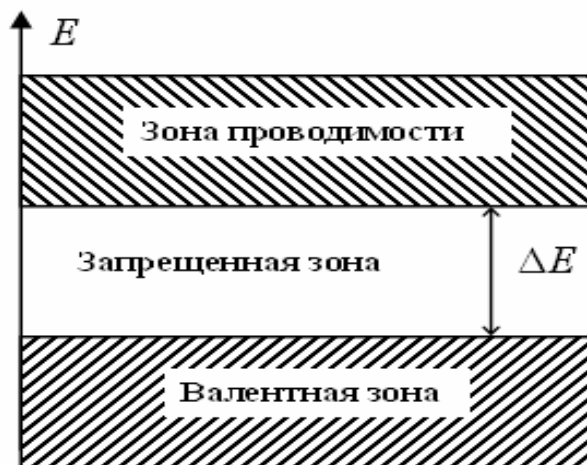


Рисунок 23 – Энергетическая диаграмма твердого тела

соответственно, отсутствием) в его энергетическом спектре частично заполненной электронами зоны, называемой зоной проводимости (в отличие от валентной зоны, заполненной целиком для всех кристаллов). Кроме того, из анализа зонной структуры становится ясно, что она качественно одинакова и у полупроводников и у диэлектриков. Различие заключается лишь в том, что у полупроводников ширина энергетической щели между валентной зоной и свободной от электронов зоной проводимости меньше, чем у диэлектриков. Поэтому условились кристаллы с энергетической щелью $\Delta E < 3$ эВ относить к полупроводникам, а с $\Delta E > 3$ эВ – к диэлектрикам.

Дальнейшее развитие теория твердых тел, основанная на представлении об энергетических зонах, получила в работах Р. Пайерлса, Р. Кронига и др. Большую роль в понимании физических свойств полупроводников сыграла теория дырок – квазичастиц, возникающих в валентной зоне и во многих отношениях схожих с электронами в зоне проводимости, однако несущих положительный заряд. Впервые понятие о дырке в полупроводнике и о дырочной проводимости ввел в 1928 году советский физик Я. И. Френкель; позднее теория дырок была развита В. Гейзенбергом и Х. Крамерсом. В том же году А. Зоммерфельд построил электронную теорию металлов на основе квантовомеханических представлений и с использованием квантовой статистики Ферми-Дирака для описания электронного газа в металле.

Большую роль в понимании физики кристаллов, в том числе полупроводниковых, сыграла созданная в 20-е годы в Ленинграде школа академика А.Ф. Иоффе. Сам Иоффе занимался изучением механических свойств кристаллов, разработал ряд вопросов, касающихся пластической деформации. В частности, им был обнаружен «эффект Иоффе» – явление увеличения прочности кристалла при растворении его поверхности. Исследование этого эффекта открыло новые возможности в работах по повышению прочности различных твердых тел. Продолжая изучение механических свойств кристаллов, ученики Иоффе А.П. Александров и С.Н. Жуков в 1933 г. получили бездефектные стеклянные нити, обладающие огромной прочностью.

Другое направление научных исследований А.Ф. Иоффе и его школы было связано с изучением электрических свойств диэлектриков и полупроводников. В частности, на основе термоэлектрических и фотоэлектрических свойств полупроводников удалось создать новые методы прямого преобразования тепловой и световой энергии в электрическую. Так, если в 1930 г. фотоэлементы превращали в электрическую энергию лишь сотые доли процента солнечной энергии, то спустя 10 лет был создан фотоэлемент из сернистого таллия с КПД $\sim 1\%$. Развивая дальше идеи Иоффе, ученые создали фотоэлементы, КПД которых в настоящее время приближается к 30%. Такие устройства нашли широкое применение как в космонавтике, так и в современной электроэнергетике («солнечные батареи»). Большую роль сыграли исследования школы Иоффе в понимании природы контактных явлений в полупроводниках и создании полупроводниковых выпрямителей, а также термоэлектродвигателей и термоэлектрических охлаждающих устройств.

§ 5.2 Магнитные свойства твердых тел

В 1929 г. голландский физик-теоретик Х. Крамерс сформулировал теорему, имеющую важное значение для понимания природы магнетизма

кристаллов. Теорема Крамерса утверждает, что энергетические уровни системы с нечетным числом электронов двукратно вырождены, однако воздействие на такую систему со стороны внешнего магнитного поля снимает указанное вырождение. С помощью этой теоремы удалось объяснить с квантовых позиций магнитные особенности твердых тел.

В частности, парамагнитные свойства свободных атомов и ионов с незаполненной внутренней электронной оболочкой (к ним относятся переходные элементы и их аналоги, а также редкоземельные элементы и актиноиды) хорошо описываются полуквантовой теорией Ланжевена-Кюри. Однако закон Кюри, согласно которому намагниченность парамагнетика обратно пропорциональна его температуре, оказывается неприменим к парамагнитным свойствам электронов проводимости в металлах. Опыт показывает, что магнитная восприимчивость составляет приблизительно 1% от значения, предсказываемого законом

Кюри для комнатной температуры. Разгадку этого парадокса нашел в 1927 г. В. Паули. Он показал, что правильный результат получается, если применить к электронам проводимости квантовую статистику Ферми-Дирака. Этот эффект получил название «спинового парамагнетизма Паули».

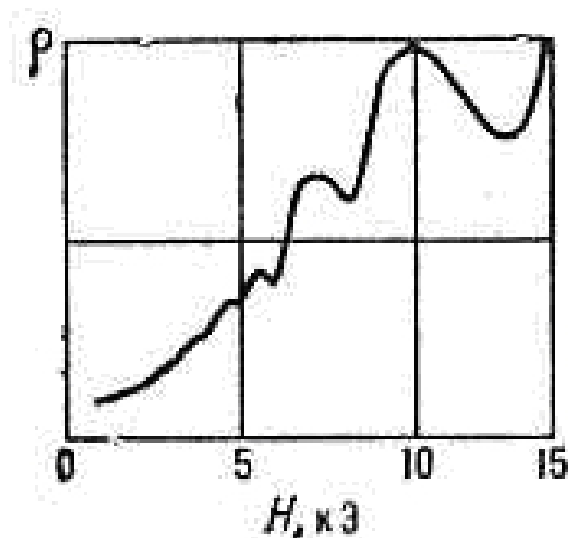


Рисунок 24 – Эффект Шубникова-де Гааза

В 1930 г. были обнаружены на опыте два эффекта, для которых характерна определенная периодичность электрических и магнитных свойств твердых тел во внешнем магнитном поле. Первый из них – эффект Шубникова-де Гааза – состоит в том, что появляются осцилляции электрического сопротивления висмута в магнитном поле при температуре жидкого гелия, т.е. около 4 К. Второй – эффект де Гааза-ван Альфена – проявляется в периодической зависимости магнитной

восприимчивости металла от магнитного поля при низких температурах. Л.Д. Ландау (1908–1968) в 1930 г. детально проанализировал оба эффекта и пришел к выводу, что они должны приводить к особому виду диамагнетизма, связанному с квантовыми свойствами электронов проводимости («диамагнетизм Ландау»). Образующиеся в магнитном поле дискретные энергетические уровни получили название «уровней Ландау».

Таким образом, к началу 30-х годов стало ясно, что наличие электронов проводимости в металлах и сугубо квантовый характер их поведения приводят к появлению у металлов специфических магнитных свойств. В общем случае магнитная восприимчивость электронного газа в металле складывается из двух компонентов противоположного знака и различающихся по величине приблизительно втрое: парамагнитной восприимчивости Паули и диамагнитной – Ландау. Полная теория эффекта де Гааза-ван Альфена была построена в 1953 г. советскими физиками И.М. Лифшицем и А.М. Косевичем. [И.М. Лифшиц (1917-1982) внес чрезвычайно большой вклад в построение современной электронной теории металлов; ему принадлежат основополагающие работы по физической кинетике и статической термодинамике полимеров. И.М. Лифшицем создана крупнейшая в стране научная школа по физике твердого тела: из нее вышли такие выдающиеся физики, как А. Ф. Андреев, М. И.

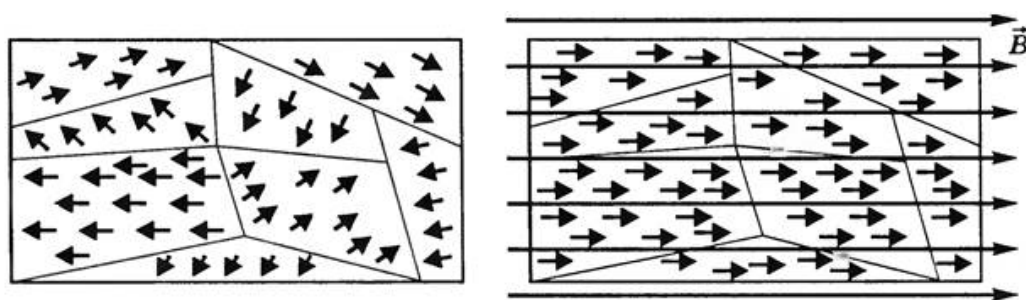


Рисунок 25 – Доменная структура ферромагнетиков. Переориентация магнитных моментов доменов во внешнем магнитном поле

Каганов, А.М. Косевич].

Как известно, наиболее сильным магнетизмом обладают ферромагнетики – твердые вещества с большой спонтанной намагниченностью, не исчезающей и при полном выключении внешнего магнитного поля. Первые попытки

теоретически обосновать это свойство были предприняты (еще до создания квантовой механики) французскими физиками П. Кюри, П. Ланжевром и П. Вейссом. Однако предложенная П. Вейссом гипотеза «внутримолекулярного поля» объясняла эффект лишь качественно, в количественном же отношении сильно расходилась с экспериментальными данными. Полное и непротиворечивое объяснение удалось построить только на основе квантовых представлений. Как показал В. Гайзенберг, причиной столь сильной и к тому же спонтанной намагниченности ферромагнетиков является обменное взаимодействие спиновых магнитных моментов атомов, а вовсе не магнитное их взаимодействие, как полагал П. Вейсс. Таким образом, ферромагнетизм, обусловленный взаимодействием спинов, имеет чисто квантовую природу. (Заметим, впрочем, что и «обычный» магнетизм, если строго и последовательно стоять на позициях классической физики, существовать не должен, – это утверждение называют теоремой Бора-ван Леевен.)

Опыт показывает, что в реальности макроскопические образцы ферромагнитного вещества нередко оказываются ненамагниченными. Причина в том, что внутри ферромагнетика в обычных условиях существуют макроскопические области спонтанного намагничивания – «домены». В пределах одного домена спины электронов ориентированы в одну сторону, однако в целом по образцу суммарные моменты доменов расположены хаотически, так что результирующий магнитный момент у всего образца равен нулю. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц показали, что образование доменной структуры является следствием конкуренции различных видов энергии: обменной, магнитной и энергии анизотропии.

Швейцарский физик Феликс Блох (1905-1983) показал в 1930 г. что элементарные возбуждения спиновой системы, каковой является домен в ферромагнетике, имеют характер волн и назвал их спиновыми волнами. Спиновые волны представляют собой колебания относительной ориентации спинов в кристаллической решетке, подобно тому как упругие (звуковые) волны в кристалле суть колебания атомов относительно своих равновесных

положений в решетке. Так же, как и упругая волна в кристалле, спиновая волна может быть проквантована; ее квант получил название магнона. Ф. Блох доказал, что относительная намагниченность в спиновой волне пропорциональна температуре в степени $3/2$ (<< закон трех вторых» Блоха).

В 1932 г. французский физик Луи Неель теоретически предсказал существование нового типа веществ с сильной спонтанной намагниченностью – антиферромагнетиков. Согласно Неелю, в таких веществах должны существовать одновременно несколько (чаще всего две) магнитных подрешеток, магнитные моменты которых (столь же большие по величине, как и у ферромагнетиков) направлены в противоположные стороны и гасят друг друга полностью или частично (в последнем случае вещество называют ферримагнетиком, или ферритом). Неель построил теорию таких магнетиков, предсказав для них температуру фазового перехода второго рода («точка Нееля»). В последующие годы ученый детально разработал теорию магнитных решеток, описал поведение новых синтетических магнитных материалов. За свои фундаментальные работы по магнетизму Неель в 1970 г. был удостоен Нобелевской премии по физике.

§5.3 Полупроводники и микроэлектроника

Исследование физических свойств полупроводников, начатое А.Ф. Иоффе и его учениками, открыло большие возможности для практического применения этих веществ. Главное преимущество приборов, изготавливаемых на основе полупроводников, – малые геометрические размеры таких устройств и высокая надежность. Использование полупроводниковых приборов и микросхем сыграло колоссальную роль в становлении всей современной цивилизации. Остановимся кратко на истории развития этой области науки.

В 1932 г. советский физик Игорь Евгеньевич Тамм (1895-1971) теоретически доказал, что, даже если на поверхности полупроводника нет никаких «посторонних» атомов, одного только обрыва кристаллической

решетки достаточно, чтобы вблизи поверхности возникли дополнительные энергетические уровни – так называемые «уровни Тамма». Несколько позднее, в 1932 г., основываясь на других соображениях, к аналогичному выводу пришел американец У. Шокли. Он обратил внимание на то, что у приповерхностных атомов имеются – из-за обрыва решетки – неспаренные валентные электроны. Условия, в которых эти электроны находятся, могут облегчить их отрыв от приповерхностных атомов. В этом случае возникают поверхностные донорные состояния. В противоположном случае неспаренные электроны вблизи поверхности приобретают способность связывать (захватывать) электроны проводимости из внутренних областей кристалла, создавая акцепторные поверхностные уровни.

Важнейшим открытием в области физики полупроводников явилось создание транзистора У. Шокли, У. Браттейном и Дж. Бардином в 1948 г.. Этому предшествовали работы по изучению поверхностных явлений в полупроводниках. Выяснилось, в частности, что поверхность полупроводника

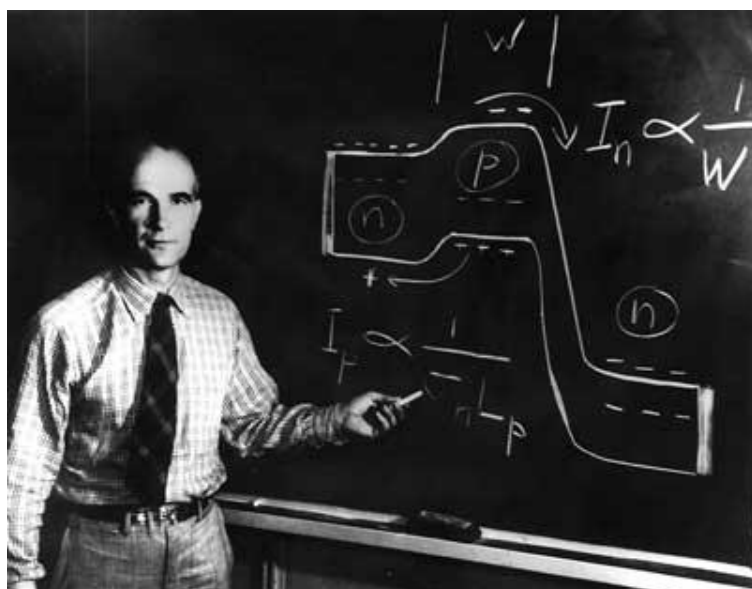


Рисунок 26 – У. Шокли поясняет принцип работы полупроводникового транзистора

всегда покрыта тончайшей пленкой окисла или примеси другого элемента, и проводимость этой пленки – иного типа, чем у самого кристалла. К 1940 году уже научились получать твердое однородное пленочное покрытие кристаллов, а контакт на его поверхности стали закреплять «намертво» вязким диэлектриком или сваркой. В 1948 г. Шокли, Браттейн и Бардин, работая с германиевыми диодами, обнаружили, что если вблизи точечного контакта поместить еще один такой же контакт и приложить к ним электрическое напряжение, то получившееся устройство сможет усиливать переменные электрические

сигналы подобно трехэлектродной лампе. Это и был транзистор. Спустя всего 10 лет, к концу 50-х годов, мировое производство транзисторов превысило 100 миллионов штук, а У. Шокли, У. Браттейн и Дж. Бардин в 1956 г. были удостоены Нобелевской премии по физике.

Миниатюрность – наиболее яркая отличительная черта транзистора. Однако суть «транзисторной революции» в электронике – далеко не только в том, что появилась возможность существенно уменьшить объем и вес радиоэлектронных устройств. Главным результатом появления транзистора явился технологический переворот в радиоэлектронике, приведший к изменению не только технологии производства, но и технологии проектирования радиоаппаратуры. Дальнейшее развитие микроэлектроники привело к появлению микросхем, в которых отдельные элементы схемы выполнены в виде тончайших пленок ничтожных размеров. В одном кубическом сантиметре объема такой микросхемы стало возможно уместить сотни тысяч микроэлементов, эквивалентных обычным сопротивлениям, конденсаторам, индуктивностям и транзисторам. Поскольку эти работы велись на мощной промышленной базе, то достигнутые технологические успехи немедленно использовались в серийном производстве.

Таким образом, 40-е гг. XX века явились настоящим прорывом в области радиоэлектроники. В то время как первые четыре десятилетия ее развития привели к появлению лишь радиосвязи и радиовещания, за два последующих родились радиолокация, радиоастрономия, радиоспектроскопия, инфракрасная техника, лазерная электроника, телевидение и электронно-вычислительная техника. Уже в самом

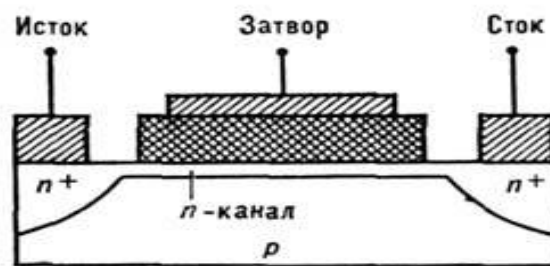


Рисунок 27 – Схема устройства полевого транзистора

конце века получили широкое распространение мобильная телефонная связь и персональные компьютеры, объединённые во всемирную сеть Интернет. Всё это в буквальном смысле изменило лицо человеческой цивилизации и

существенно повлияло на психологию людей.

Но вернемся к полупроводниковым устройствам и истории их развития. Ещё в 1925 г. американский исследователь Дж. Лилиенфельд предложил идею прибора, который мог бы усиливать электрические сигналы. Идея заключалась в том, что под действием внешнего напряжения, приложенного к полупроводниковой пластине перпендикулярно прохождению основного тока, в пластине возникает слой, в той или иной степени (в зависимости от приложенного напряжения) обедненный или обогащенный носителями заряда. Регулируя толщину этого слоя, можно было усиливать или ослаблять проходящий через пластину ток. Однако по чисто технологическим причинам (в то время еще не умели изготавливать полупроводники требуемой чистоты и с достаточно малой толщиной) идея Лилиенфельда оказалась нереализованной более четверти века. Лишь в 1952 г. У. Шокли предложил новый прибор на основе идеи Лилиенфельда – полевой транзистор.

Конструкция полевого транзистора проста: тонкая пластина полупроводника с двумя омическими контактами на концах, истоком и стоком, и третьим электродом – затвором, размещенным посередине и изолированным от полупроводника слоем диэлектрика. Усиление электрических сигналов возникает благодаря тому, что напряжение, приложенное между затвором и пластиной полупроводника, изменяет концентрацию носителей в полупроводнике и модулирует тем самым его сопротивление. Такой прибор обладает очень большим входным сопротивлением, что делает его незаменимым во многих электронных схемах.

В 1957 г. японский физик Лео Эсаки создал новый полупроводниковый прибор, работа которого основана на сугубо квантовом туннельном эффекте. Туннельный диод, или диод Эсаки, имеет столь малую толщину p - n перехода (обедненного носителями слоя) – порядка 10^{-8} м, – что энергетический барьер между p - и n -областями оказывается «прозрачным» для туннелирования электронов из валентной зоны в зону проводимости и обратно. Туннельные диоды изготавливают из высоколегированных полупроводниковых материалов.

Суперпозиция туннельного и обычного зонного механизмов проводимости приводит к тому, что на вольт-амперной характеристике появляется участок с отрицательным сопротивлением, а вся характеристика приобретает N-образную форму. Таким образом, выполняется необходимое условие генерации, что и определяет главную область применения туннельных диодов – генерацию электромагнитных волн СВЧ-диапазона.

Принципиально иной полупроводниковый прибор с такой же, как у туннельного диода, N-образной вольт-амперной характеристикой изобрел в 1963 г. американский физик Джон Ганн. Он исследовал свойства новых тогда полупроводников: арсенида галлия GaAs и фосфида индия InP. При этом Ганн обнаружил, что, начиная с определенного «порогового» значения внешнего напряжения, поданного на исследуемый кристалл, ток сквозь кристалл начинает колебаться – возникает генерация, как и в туннельном диоде, но

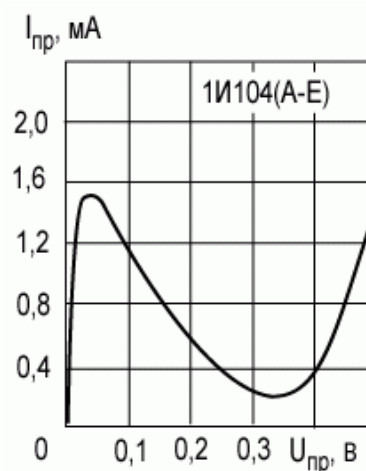


Рисунок 28 – Вольт-амперная характеристика туннельного диода

по совершенно иным физическим причинам. Диоды Ганна стали широко применяться для генерации токов сверхвысоких частот. Позднее эффект Ганна был обнаружен примерно в 20 полупроводниковых соединениях: антимониде индия InSb, четверном соединении InGaAsP и др. Микроволновые излучатели построенные на основе туннельных диодов, диодов Ганна и им подобных, серьезно продвинули вперед радиоэлектронику и радиолокацию, благодаря им резко уменьшились размеры соответствующей аппаратуры и потребляемые ею мощности.

§ 5.4 Эффект Мессбауэра

Еще в начале 30-х гг, после того как стала ясна электромагнитная природа радиоактивного гамма-излучения, физики заинтересовались

проблемой резонансного поглощения гамма-квантов атомными ядрами и возможностью наблюдать этот эффект на опыте. Поскольку резонансное (избирательное) поглощение происходит лишь на определенных частотах, отвечающих энергиям квантовых переходов ядер в возбужденное состояние, наблюдение такого эффекта дало бы физикам тонкий инструмент для исследования атомных ядер. Однако поначалу все попытки обнаружить на опыте это явление заканчивались неудачей.

Некоторое время спустя теоретики смогли выяснить причину неудач. Известно, что гамма-квант обладает определенным импульсом, который он, в соответствии с законами сохранения, при поглощении передает ядру; последнее испытывает отдачу: приобретая энергию, оно получает также импульс движения в противоположном направлении («отскок» ядра). Такая же энергия отбирается у ядра при испускании гамма-кванта. При этом линии испускания и поглощения оказываются смещенными относительно друг друга на величину, значительно превышающую ширину линии гамма-излучения. Установив причину неудачи, исследователи пытались преодолеть возникшие трудности каким-либо искусственным путем. Однако эффективный метод наблюдения резонансного поглощения гамма-квантов был найден лишь несколько лет спустя.

В 1955 г. в Институт им. Макса Планка в Гейдельберге (ФРГ) поступил в аспирантуру молодой физик Рудольф Мессбауэр. Темой его диссертации было «Исследование резонансного поглощения гамма-квантов». Случилось так, что эта диссертация принесла аспиранту не только докторскую степень, но и Нобелевскую премию. По плану, намеченному руководителем лаборатории, вначале предполагалось применить уже известный метод наблюдения резонанса путем сильного нагрева излучающего вещества и вещества приемника. Однако у Р. Мессбауэра были свои идеи, и он, несмотря на риск провала диссертации, пошел по другому пути. Мессбауэр задался вопросом: если причиной исчезновения резонанса является отскок атомных ядер, то нельзя ли найти какой-нибудь способ «фиксировать» ядра? Ответ оказался

гениально простым. Это возможно, если атом связан в кристаллической решетке твердого тела и если кристалл охлажден до температуры, близкой к абсолютному нулю. В этом случае отскок атомного ядра при поглощении им гамма-кванта передается сразу огромному числу атомов решетки, а энергия гамма-кванта «вливается» в энергию колебаний решетки. Сам Мессбауэр приводил пример со стрельбой из винтовки. При выстреле корпус винтовки резко отбрасывается в сторону, противоположную полету пули («отдача»), но если винтовка упирается в стену, то отдача ничтожно мала, т.к. масса стены многократно превосходит массу винтовки. Реализовать свою идею на опыте Мессбауэру удалось только в 1958 году, когда его диссертация уже «висела на волоске». В эксперименте Р. Мессбауэр использовал кристалл иридия, охлажденный жидким воздухом. Тогда-то и был открыт «ядерный гамма-резонанс без отдачи ядра», или, как его с тех пор стали называть, эффект Мессбауэра.

Вновь открытый эффект дал в руки ученым чрезвычайно тонкий экспериментальный метод исследования, нашедший широкое применение в различных областях физики и техники. Этот метод позволяет измерять совершенно ничтожные изменения энергии, которые невозможно зарегистрировать никакими другими способами. Так с помощью эффекта Мессбауэра удалось измерить в лабораторных условиях гравитационное смещение спектральных линий, предсказанное общей теорией относительности Эйнштейна (о чем кратко упоминалось в конце главы 3). Согласно ОТО, фотон, движущийся вертикально в поле тяжести Земли, меняет свою энергию на некоторую (чрезвычайно малую) величину, пропорциональную пройденному им пути. При движении вниз частота фотона в гравитационном поле увеличивается («фиолетовое смещение»), при подъеме вверх – уменьшается («красное смещение»). Соответствующий опыт поставили американские физики Р. Паунд и Дж. Ребка в 1959 г. в башне Гарвардского университета. Высота башни составляла 22,6 м.; в качестве излучателя и поглотителя использовались образцы из изотопа железа $^{57}_{26}\text{Fe}$, охлажденные до температуры

жидкого гелия (около 4 К). Относительное изменение энергии фотона в этом опыте составляло $2.46 \cdot 10^{-15}$, а абсолютное – $3.4 \cdot 10^{-11}$ эВ, что приблизительно в 300 раз меньше естественной ширины линии. Полученный результат полностью подтвердил предсказание ОТО. Заметим, что обнаруженный в лабораторных условиях эффект примерно в миллиард раз меньше гравитационного смещения, вызываемого полем тяготения Солнца и измеряемого астрономическими методами.

С помощью эффекта Мессбауэра можно исследовать продолжительность жизни различных изотопов, магнитные поля атомов и другие свойства твердых тел. Сам Р. Мессбауэр за свое открытие был удостоен Нобелевской премии по физике в 1961 г.

Глава 6 Оптика и квантовая электроника

§ 6.1 Новые оптические приборы и новые методы наблюдения

В XX веке, по мере проникновения в тайны микромира, исследователям потребовались оптические приборы, способные «заглянуть» в глубины материи, «увидеть» объекты, размеры которых сопоставимы с размерами молекулы, атома и т.п. В ответ на потребности науки был создан принципиально новый оптический прибор – электронный микроскоп.

Электронный микроскоп был изобретен в Германии в 1931 г. (Э. Руска, Эм. Кнолл). Принцип действия прибора состоит в том, что вместо световых лучей (как в обычном микроскопе) в нем используется пучок быстро летящих в вакууме электронов, ускоренных разностью потенциалов в несколько десятков или даже сотен киловольт, а вместо стеклянных (оптических) линз применяются электронные линзы. Тем самым достигается гораздо большее разрешение (увеличение) рассматриваемых в микроскоп мельчайших объектов. Так, электронный микроскоп,



Рисунок 29 – В.К. Зворыкин работает с электронным микроскопом в Принстонской лаборатории

построенный изобретателем первой телевизионной передающей трубки В.К. Зворыкиным в 1939 г., позволял «увидеть» микрообъекты с увеличением в 100 000 раз.

По мере развития научной и технической мысли оптические приборы все более совершенствовались. В 1935 г. Ф. Цернике конструирует фазоконтрастный микроскоп. Уже после Второй мировой войны, в 1951 г.,

швейцарец Э. Мюллер построил автоионный микроскоп, в котором вместо электронов применялись ионы, благодаря чему разрешающая способность микроскопа повышалась еще примерно на три порядка (т.к. дебройлевская длина волны иона в соответствующее число раз меньше).

Эти усовершенствования оптических приборов позволили открыть много нового и неизведанного. Так, с помощью электронных и ионных микроскопов в 50-е гг. удалось непосредственно наблюдать отдельные крупные молекулы – это были молекулы биологических структур (белок, ДНК и др.). Благодаря наличию столь совершенных и тонких оптических инструментов в 50-е–60-е гг. достигла таких впечатляющих успехов новая область науки – молекулярная биология. В 1970 г. с помощью сканирующего электронного микроскопа впервые удалось наблюдать отдельные атомы вещества. В 1986 г. за создание первого электронного микроскопа немецкий физик Э. Руска был удостоен Нобелевской премии.

Выдающимся открытием в области оптики явился обнаруженный в 1934 г. эффект Вавилова-Черенкова. Он состоит в особом рода свечении жидкости под действием проходящих сквозь нее заряженных частиц. Объяснение эффекта было дано советскими физиками И.Е. Таммом и И.М. Франком в 1937 г. Они показали, что конусообразное свечение, возникающее при движении частицы через жидкую среду, обусловлено тем, что частица движется сквозь нее со скоростью, превышающей скорость света в данной среде. Иными словами, имеет место явление, аналогичное ударной волне, возникающей в воздухе при движении объекта (например, самолета) со сверхзвуковой скоростью. Эффект Вавилова-Черенкова нашел многочисленные применения в различных областях физики. П.А. Черенкову, И.Е. Тамму и И.М. Франку за открытие и объяснение этого эффекта в 1958 г. была присуждена Нобелевская премия по физике.

§ 6.2 Создание квантовых усилителей и генераторов электромагнитного излучения

В 1939 г. советский физик В.А.Фабрикант (1907-1991), основываясь на идее Эйнштейна об индуцированном испускании света атомом (подробнее об этом открытии Эйнштейна см. § 2.3), рассмотрел вопрос об усилении излучения при его прохождении через вещество. Фабриканту удалось показать, что для такого усиления в веществе надо создать инверсную заселенность энергетических уровней, т.е такую, весьма специфическую, ситуацию, когда число атомов или молекул на более высоком уровне энергии оказывается больше, чем на нижнем. (Заметим, что подобное состояние вещества должно быть крайне неравновесным: рассуждая сугубо формально и исходя из больцмановского распределения, можно говорить о том, что веществу с инверсной заселенностью уровней свойственна отрицательная температура). Но как практически осуществить инверсную заселенность?

В 1951 г. Фабрикант с сотрудниками подают заявку на изобретение способа усиления излучения при помощи вынужденного испускания. На эту заявку было выдано свидетельство, где в графе «предмет изобретения» записано: ***«Способ усиления электромагнитных излучений (ультрафиолетового, видимого, инфракрасного и радиодиапазонов волн), отличающийся тем, что усиливаемое излучение пропускают через среду, в которой с помощью вспомогательного излучения или другим путем создают избыточную, по сравнению с равновесной, концентрацию атомов, других частиц или их систем на верхних энергетических уровнях, соответствующих возбужденным состояниям».***

На практике способ усиления излучения, предложенный Фабрикантом, удалось вначале реализовать не в оптическом, а в радиодиапазоне, точнее, в диапазоне сверхвысоких частот (в англоязычной научной литературе этот диапазон называют «микроволновым излучением»). В мае 1952 г. на Общесоюзной конференции по радиоспектроскопии советские физики Н.Г.

Басов (1922-2001) и А.М. Прохоров (1916-2002) сообщили о принципиальной возможности создания квантового генератора излучения в СВЧ-диапазоне. Они назвали его «молекулярным генератором», поскольку в нем использовался пучок молекул аммиака NH_3 . Одновременно аналогичную идею выдвинул американский физик Чарльз Таунс (родился в 1915 г). Он предложил для нового устройства аббревиатуру «maser» (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation – усиление микроволн с помощью индуцированного испускания). В 1954 г. мазер стал реальностью: он был разработан и создан одновременно и независимо в Физическом институте им. П.Н. Лебедева Академии наук в Москве (группой под руководством Басова и Прохорова) и в Колумбийском университете США (группой под руководством Таунса).

Создание мазера означало появление новой области науки и техники – квантовой электроники. Естественно было считать, что вскоре после создания квантового генератора в радиодиапазоне – мазера – будет создан и квантовый генератор в оптическом диапазоне – лазер (где в аббревиатуре maser слово «Microwave» заменено словом «Light» – свет). Однако для этого потребовалось целых 6 лет. Причины столь длительного пути от мазера к лазеру объяснил позднее Прохоров в своей Нобелевской лекции: *«Здесь были две*

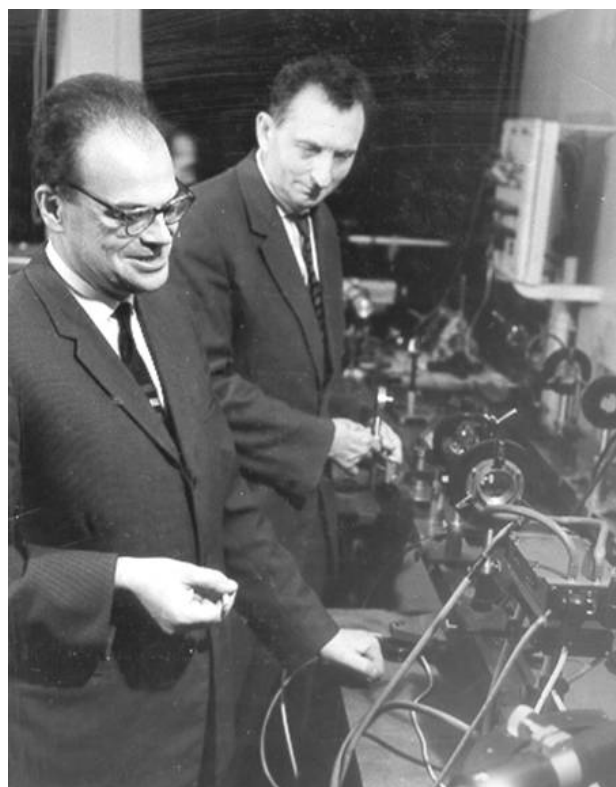


Рисунок 30 – Н.Г. Басов (слева) и А.М. Прохоров (справа) в лаборатории ФИАН

трудности. Первая трудность заключалась в том, что тогда не были предложены резонаторы для оптического диапазона длин волн, и вторая – не были предложены конкретные системы и методы получения инверсной заселенности в оптическом диапазоне».

В 1955 г. Н.Г. Басов и А.М. Прохоров обосновали применение метода оптической накачки для создания инверсной заселенности уровней. В 1957 г. Н.Г. Басов выдвинул идею о применении полупроводников для создания квантовых генераторов, при этом он предложил использовать в качестве резонатора специально обработанные поверхности самого полупроводникового образца. В 1958 г. А.М. Прохоров и независимо от него американские физики А. Шавлов и Ч. Таунс теоретически обосновали возможность практического применения явления вынужденного испускания в оптическом диапазоне. Им принадлежит идея применять в оптическом диапазоне не объемные (как в СВЧ-диапазоне), а открытые резонаторы. Конструктивно открытый резонатор отличается от объемного тем, что у последнего убраны боковые стенки (сохранены только торцовые отражатели, фиксирующие в пространстве ось резонатора) и линейные размеры много больше длины волны излучения.

Интенсивные теоретические исследования, проводившиеся советскими и американскими учеными, привели к тому, что в 1960 г. американский физик Теодор Мейман создал первый оптический квантовый генератор – лазер. Он получил на кристалле рубина генерацию излучения в оптическом диапазоне. В том же году американским физикам А. Джавану, В. Беннету и Д. Эрриоту удалось получить генерацию оптического излучения в электрическом разряде в смеси неона и гелия. Так родился первый газовый лазер.

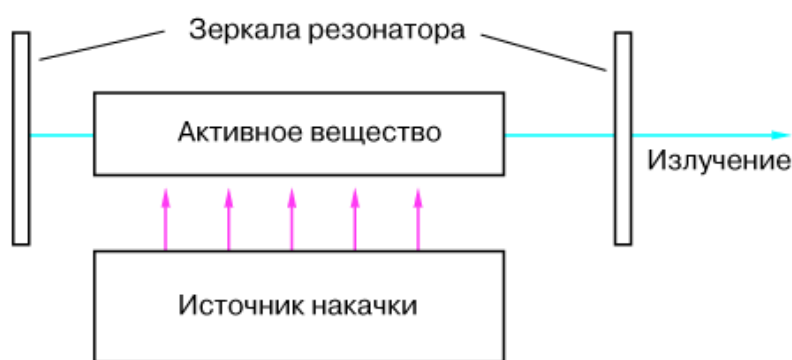


Рисунок 31 – Принципиальная схема лазера

Начиная с 1961 г. лазеры разных типов (твердотельные и газовые) занимают прочное место в оптических лабораториях. Осваиваются новые активные среды, разрабатывается и совершенствуется технология изготовления лазеров. В 1962-63 гг. в СССР и в США одновременно создаются

полупроводниковые лазеры.

В 1964 г. Н. Г. Басов, А. М. Прохоров и Ч. Таунс стали лауреатами Нобелевской премии по физике.

§ 6.3 Возникновение и развитие голографии

Идеи голографии, ее принципы и методы начали формироваться еще до создания лазера. Голографический метод получения изображений предложил и экспериментально осуществил польский физик М. Вольфке. В 1920 г. он опубликовал работу «О возможности оптического изображения молекулярной решетки». В работе было показано, что, используя дифракцию рентгеновских лучей на кристалле, можно получить оптическое изображение кристаллической решетки. К сожалению, работа М. Вольфке не нашла поддержки и понимания у современников и оказалась надолго забытой.

Идеи и принципы голографии были заново сформулированы в 1948 г. английским ученым венгерского происхождения Деннисом Габором (1900–1979), не знакомым в то время с работой Вольфке. Д. Габор пришел к идее голографии, занимаясь весьма практической задачей: он изучал возможности повысить разрешающую способность электронного микроскопа. В своей работе «Новый принцип микроскопии» Габор сформулировал двухступенчатый метод получения голографических изображений и, при изложении результатов своих исследований, ввел термин «голограмма». Термин «голография» появился позднее, Габор называл описанный им метод **«методом восстановления волнового фронта»**.

Запись голограммы объекта Д. Габор осуществлял с помощью электронного пучка, используя волновые свойства электронов. В качестве объекта он взял тонкую прозрачную пленку – транспарант. Электронный пучок, проходя сквозь транспарант, частично рассеивался. Рассеянная часть пучка интерферировала с той его частью, которая не испытала рассеяния (Габор называл ее «когерентным фоном») в результате

возникала интерференционная картина на голограмме. Восстановление волнового фронта (считывание голограммы) Габор производил оптическим излучением, применяя в качестве источника света дуговую ртутную лампу с монохроматором.

Несмотря на невысокую степень когерентности света, Габору все же

удалось получить изображение объекта. Правда, оно было довольно низкого качества, а главным минусом было то, что на действительное изображение объекта накладывался двойник – мнимое изображение.

В 40-е–50-е гг. очень немногие физики отнеслись серьезно к исследованиям Габора. Полагали, что его метод может иметь значение лишь для электронной и рентгеновской микроскопии. Только в 1971 г. Д. Габор был удостоен Нобелевской премии по физике за свои работы в области голографии.

Когда через 12 лет после работы Д. Габора «Новый принцип

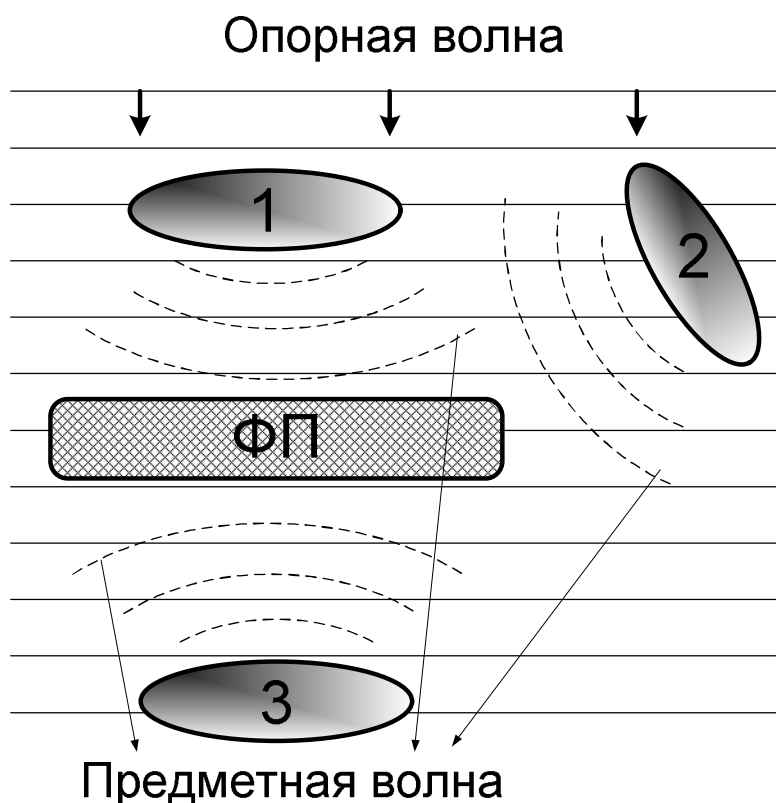


Рисунок 32 – Взаимное расположение фотопластинки (ФП) и объекта в голографических схемах Габора (1), Лейта и Упатниекса (2), Денисюка (3), а также предметной и опорной волн

микроскопии» появился источник когерентного света – лазер, сразу же возродился интерес к голографии. Теперь не только считывание, но и запись голограммы стали делать оптическим излучением, используя схему Габора. Однако, несмотря на применение лазера, восстанавливаемое изображение имело двойника, от которого никак не удавалось избавиться.

В 1961 г. американские физики Э. Лейт и Ю. Упатниекс, изучив габоровскую схему пришли к выводу, что когерентный фон играет, по сути дела, роль опорной волны. Они предложили отделить эту волну от волны, отраженной объектом, с тем чтобы они пересекались и интерферировали только на фотопластинке. Предложенный Э. Лейтом и Ю. Упатниексом двухлучевой метод записи голограммы (с использованием объектного и опорного световых пучков, распространяющихся под углом друг к другу) получил широкое распространение. На рисунке 32 схематично показано взаимное расположение фотопластинки и объекта, а также предметной и опорной волн в голографических схемах Габора, Лейта и Упатниекса, Денисюка.

В 1962 г. советский физик Ю. Н. Денисюк предложил объемные голограммы на основе толстослойных фотоэмульсий. Он же разработал метод записи этих голограмм во встречных световых пучках. В методе Денисюка лазерный пучок вначале проходит через фотоэмульсию, это – прямой пучок, он играет роль опорной волны. За фотоэмульсией располагается объект. Он отражает часть прошедшего через фотоэмульсию пучка назад, к фотоэмульсии: это – встречный пучок, он является объектной волной. При считывании голограммы световой пучок падает на нее так же, как падал опорный пучок на этапе записи. В результате брэгговского отражения часть пучка отражается назад, формируя волну, являющуюся копией объектной волны. Наблюдатель видит мнимое изображение объекта за голограммой – там, где во время записи находился сам объект.

§ 6.4 Нелинейная оптика

В долазерной (некогерентной) оптике справедливо считалось, что оптические характеристики среды, такие как диэлектрическая восприимчивость, проницаемость, показатель преломления и т.п., – не зависят от интенсивности света, проходящего сквозь среду. Причина этого заключалась в том, что оптические поля, генерируемые нелазерными источниками света, всегда много меньше внутриатомных и межатомных полей в среде. В самом деле, существующие нелазерные источники света дают напряженность светового поля не более 10^5 В/м, тогда как внутриатомные поля имеют порядок 10^9 – 10^{12} В/м. Естественно, что при таком соотношении световой волне просто не хватает интенсивности для сколь-нибудь заметного влияния на внутриатомные поля, а следовательно, и на оптические характеристики вещества.

С появлением лазеров ситуация изменилась коренным образом. Высокая степень когерентности лазерного излучения позволяет осуществлять чрезвычайно сильную пространственную концентрацию световой мощности. Лазеры позволили реализовать оптические поля с напряженностью 10^7 – 10^{11} В/м, а это означает, что теперь напряженность поля световой волны сопоставима с напряженностью внутриатомных полей в среде.

Таким образом, с появлением лазеров возникла реальная необходимость учитывать зависимость оптических характеристик вещества от интенсивности проходящей через вещество световой волны. Необходимость учета такой зависимости – своеобразный «водораздел», который лежит между старой (долазерной) и новой (лазерной) оптикой. Долазерную оптику принято называть линейной оптикой, а лазерную – нелинейной. Характерная черта нелинейной оптики – это зависимость оптических параметров среды от интенсивности световой волны, проходящей сквозь среду.

Рассмотрим основные этапы развития нелинейной оптики. В 1961 г. американский физик П. Франкен наблюдал в кристалле кварца генерацию

второй гармоники излучения рубинового лазера. В 1961-63 гг. советские физики Р.В. Хохлов и С.А. Ахманов вывели условия, при которых должны эффективно наблюдаться различные нелинейно-оптические явления, в том числе генерация оптических гармоник. Они же выдвинули и теоретически обосновали идею параметрической генерации света. Выполненные в начале 60-х годов в Лаборатории нелинейной оптики при МГУ им. М. В. Ломоносова фундаментальные теоретические работы нашли отражение в монографии С.А. Ахманова и Р.В. Хохлова «Проблемы нелинейной оптики» (1965 г.). Одновременно теоретические исследования в области нелинейной оптики проводились группой американских ученых, возглавляемой Н. Бломбергом (Нобелевская премия 1981 г.).

С середины 60-х гг. нелинейная оптика оформилась как развитое, самостоятельное направление современной оптики. К этому времени появились достаточно эффективные генераторы оптических гармоник и первые параметрические генераторы света.

§ 6.5 Применение лазеров

Две наиболее значимых сферы применения лазеров уже были рассмотрены выше – это голография и нелинейная оптика. Однако сегодня лазеры широко используются не только в физике, но и во многих других областях науки и техники, причем в некоторых из них появление лазерных технологий произвело поистине революционный переворот. Остановимся более подробно на некоторых из применений лазеров.

1. Обработка материалов лазерным лучом

Благодаря огромной концентрации световой энергии лазерного луча как в пространстве, так и во времени (при работе лазера в импульсном режиме) открываются невиданные ранее технологические возможности для обработки различных материалов. К примеру, при производстве механических

высокоточных часов необходимо высверливать в рубине – материале весьма твердом и в то же время хрупком – отверстия строго цилиндрической формы диаметром 0,1-0,05 мм. Для этой цели применяют импульсные твердотельные лазеры, с помощью которых отверстие в кристалле рубина пробивается серией из нескольких импульсов, имеющих энергию 0,1-0,05 Дж и длительность порядка 10^{-4} с. Производительность при этом повышается в 1000 раз по сравнению с механическим сверлением.

Чтобы получить тончайшую проволоку из меди, бронзы, вольфрама и др. металлов, применяют технологию протягивания



Рисунок 33 – Высокоточная лазерная резка металла. Расплавленный металл выдувается сжатым аргонem

(волочения) проволоки сквозь отверстия очень малого диаметра в каком-либо особо твердом материале, например, в алмазе. На как просверлить тонкое (10 мкм) отверстие в таком сверхтвердом материале, как алмаз? И здесь приходит на помощь лазерный луч. Можно привести и другие примеры тех поистине уникальных технологических возможностей, который открывает применение лазеров.

Лауреат Нобелевской премии академик Н.Г. Басов писал: *«Лазерный луч – это уникальный тепловой источник, способный нагреть облучаемый участок детали до высоких температур за столь малое время, в течение которого тепло не успевает «растекаться». Нагреваемый участок может быть при этом размягчен, рекристаллизован, расплавлен, наконец, его можно испарить. Дозируя тепловые нагрузки путем регулировки мощности и продолжительности лазерного облучения, можно обеспечить практически любой температурный режим и реализовать различные виды термообработки. Лазерный нагрев используется для поверхностной закалки и легирования металлов, для плавления при сварке, для плавления и*

испарения с выбросом паров при резке и сверлении».

2. Лазеры в медицине

Начиная со второй половины 60-х годов лазерный луч стал широко применяться в медицине, в первую очередь в качестве хирургического инструмента, обладающего целым рядом преимуществ по сравнению с обычным скальпелем.

Во-первых, луч лазера производит относительно бескровный разрез, т.к. одновременно с рассечением тканей коагулирует края раны, «заваривая» не слишком крупные кровеносные сосуды;

Во-вторых, лазерный скальпель отличается постоянством режущих свойств, надежностью в работе. Если случайное попадание на твердый предмет, например кость, может вывести механический скальпель из строя, то для лазерного скальпеля такой опасности нет. Лазерным лучом можно даже разрушать камни в почках и желчных протоках;

В-третьих, лазерный луч в силу своей прозрачности позволяет хирургу хорошо видеть опираемый участок. Лезвие же обычного скальпеля всегда в

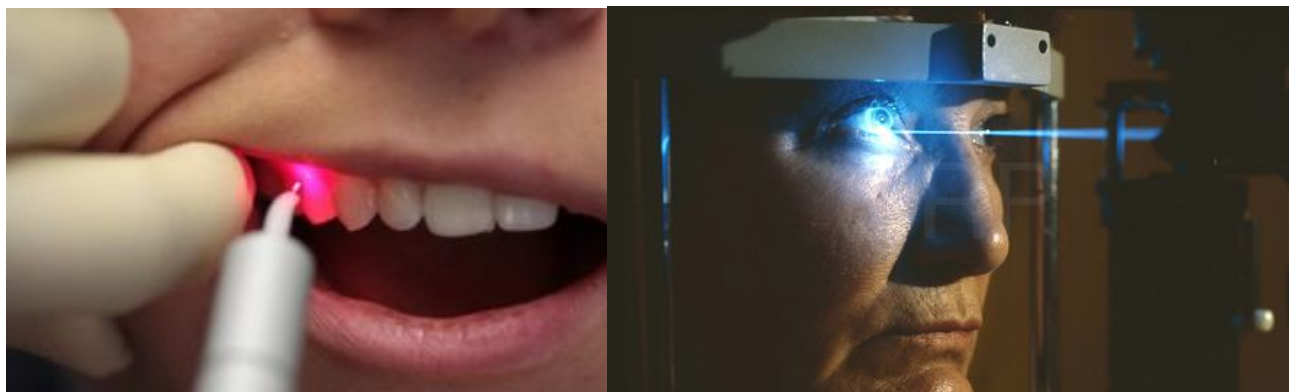


Рисунок 34 – Лазерная стоматология и лазерная офтальмология – самые передовые области современной медицины

какой-то степени загораживает от хирурга операционное поле;

В-четвертых, лазерный скальпель обеспечивает абсолютную стерильность, поскольку непосредственно с тканью взаимодействует только излучение. К тому же, в области рассечения ткани возникает высокая температура;

В-пятых, луч лазера действует локально, испарение ткани происходит только в точке фокуса. Прилегающие участки ткани повреждаются при этом значительно меньше, чем при использовании механического скальпеля;

В-шестых, как показывает клиническая практика, в отличие от обычных ран рана от лазерного скальпеля почти не болит и относительно быстро заживает.

В силу вышеперечисленных преимуществ, лазерный луч нашел исключительно широкое применение в таких областях медицины, как офтальмология, косметология, стоматология и лазерная внутриполостная хирургия.

В последнее время активно развивается лазерная терапия, основанная на селективном облучении отдельных органов и тканей за счет высокой спектральной плотности энергии лазерного излучения. Отдельного упоминания при этом заслуживает лазерная терапия злокачественных опухолей. Так, известно, что особенностью раковых клеток является сильная степень смещения лимфо-клеточного обмена в сторону потребления. При введении в организм молекул биологически нейтрального сенсibilизатора он в большей степени поглощается именно в раковыми клетками и достаточно долго (2-7 суток) не выводится. При облучении такой ткани лазерным излучением с длиной волны в полосе поглощения молекул сенсibilизатора они поглощают излучение и способствуют гибели злокачественных клеток за счет возрастания температуры в клетке и появления химически активных радикалов.

3. Лазеры в локации и измерительной технике

В последние десятилетия в авиации и космонавтике широко используются импульсные лазерные лоаторы, основное назначение которых – такое же, как и радиолокаторов: обнаружение и распознавание удаленных объектов, слежение за перемещением этих объектов, получение информации о характере объектов и их движении. Как и в радиолокации, в оптической локации для обнаружения объекта и получения информации о нем

используются импульсы излучения, отраженные объектом. При этом оптическая локация обладает рядом преимуществ по сравнению с радиолокацией. Лазерный локатор позволяет более точно определять координаты и скорость объекта. Более того, он дает возможность выявлять размеры объекта, его форму, ориентацию в пространстве.

Преимущества лазерной локации связаны с возможностью формировать остронаправленные световые пучки, высокой частотой оптического излучения, исключительно малой длительностью световых импульсов (измеряемой наносекундами и даже пикосекундами). В самом деле, остронаправленным лучом можно буквально «ощупать» объект, «просмотреть» разные участки его поверхности. Высокая частота оптического излучения позволяет более точно измерить скорость объекта: как известно, доплеровское смещение частоты при движении источника

$$\Delta \nu = \nu_0 \left(1 + \frac{u}{c} \right),$$

где u – скорость измеряемого тела, ν_0 – исходная частота, c – скорость света.

Отметим, что в локации очень важно использовать короткие импульсы излучения. Дело в том, что измеряемое с помощью локатора расстояние до объекта равно

$$L = c \cdot \Delta t,$$

где Δt – промежуток времени от отправления зондирующего импульса до приема отраженного импульса. Чем короче сам импульс, тем более точно можно определить Δt , а следовательно, и расстояние до объекта.

В 1970 г. советскими учеными впервые была осуществлена лазерная локация Луны с помощью автоматического аппарата «Луноход-1». С Земли посылались лазерные импульсы, которые отражались от специального уголкового отражателя, установленного на «Луноходе-1», – такой отражатель, представляющий собой стеклянную трехгранную пирамиду с тремя взаимно перпендикулярными гранями, обладает тем свойством, что луч, падающий под любым углом на отражатель, будет отражаться параллельно самому себе. В

этом эксперименте удалось определить расстояние от Земли до Луны с точностью до нескольких десятков сантиметров, т. е. погрешность измерения составила 10^{-9} . В дальнейшем лазерную локацию стали широко применять не только в космонавтике (например, при осуществлении стыковки космических аппаратов или для точного определения высоты аппарата над поверхностью планеты), но и в авиации.

Преимущества

лазерного излучения, неоднократно упоминавшиеся выше, привели к широкому использованию лазеров в измерительной технике. Были сконструированы лазерные дальномеры, позволяющие измерять и

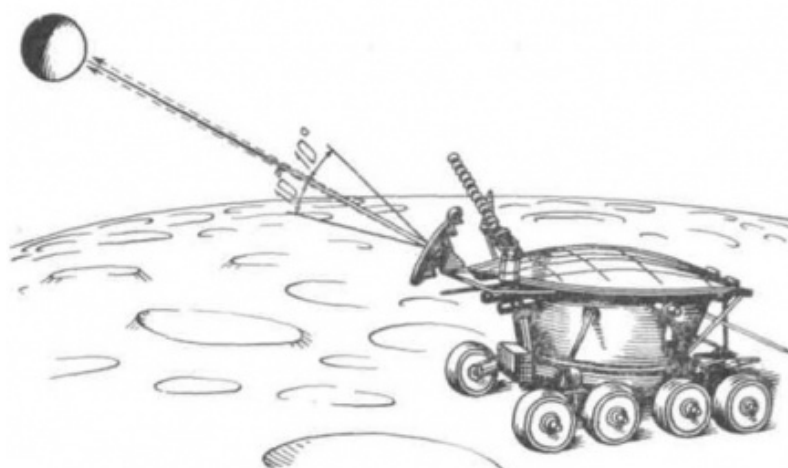


Рисунок 35 – Схема опыта по лазерной локации Луны проведенного в СССР в 1970 г.

контролировать расстояния от десятков метров до нескольких километров с точностью до миллиметров и даже долей миллиметра. В современной измерительной технике активно применяют лазерные интерферометры. Для высокоточных измерений угловой скорости вращающегося тела используют лазерные гироскопы. Лазерные доплеровские анемометры позволяют с огромной точностью измерять скорость частиц в потоке жидкости или газа.

4. Лазерная связь

С изобретением лазера человек получил в свое распоряжение источник интенсивного когерентного электромагнитного излучения в оптическом диапазоне частот – вплоть до 10^{15} Гц (т. е. вплоть до длин волн порядка 0,1 мкм). В связи с этим появилась возможность распространить принципы радиосвязи на оптический диапазон. Возникла и стала развиваться лазерная связь – связь, осуществляемая при помощи модулируемого лазерного

излучения. Как известно, частота модуляции (скорость передачи данных), применяемая в радиотехнике для передачи речи, музыки или изображения, должна быть по крайней мере в 10-100 раз меньше частоты самой волны («несущей частоты»). Ширина полосы частот модуляции тем больше, чем больше объем информации, передаваемой в единицу времени. Приведем для наглядности некоторые цифры.

Для передачи речи достаточна полоса частот 10-1000 Гц, тогда как для передачи музыки требуется полоса шириной 10^4 Гц. Именно такова ширина полосы частот радиовещания. Чтобы не мешать друг другу, две радиостанции должны работать на несущих частотах, различающихся не менее чем на 10^4 Гц. Это означает, что в классическом радиодиапазоне – от длинных (километровых) до ультракоротких (метровых) волн – могут одновременно работать, не мешая друг другу, не более 10 000 радиостанций – при условии использования каждой из них строго определенной несущей частоты.

Для передачи движущихся изображений требуется полоса частот модуляции, в 1000 раз более широкая, чем в радиовещании: телевизионная полоса частот имеет ширину порядка 10^7 Гц. Это значение соответствует верхней граничной частоте видеосигнала. Чтобы передавать информацию, требующую полосы частот модуляции шириной 10^7 Гц, нужна несущая частота не ниже 10^8 Гц. Для этого надо перейти из классического радиодиапазона в СВЧ-диапазон. В частотном диапазоне, отвечающем, например, дециметровым волнам (от 10^8 до 10^9 Гц), «умещается» около 100 телевизионных каналов.

Приведенные примеры иллюстрируют общее правило: по мере увеличения несущей частоты возрастает информационная емкость канала связи. Ясно, что использование оптического когерентного излучения с несущей частотой до 10^{15} Гц могло бы весьма существенно увеличить информационную емкость канала связи. Освоение оптического диапазона помогло бы решить проблему «тесноты в эфире»: вещательные станции, использующие лазерное излучение, смогут работать, не мешая друг другу, даже при условии, что число станций в сотни и тысячи раз превысит число тех, что работают в

радиодиапазоне.

Говоря о перспективности лазерной связи, отметим еще одно достоинство лазерного луча – его высокую направленность. Обычные радиостанции излучают в пределах широкого телесного угла. Применяя специальные антенны, добиваются направленности излучения. Однако степень ее остается существенно более низкой по сравнению с направленностью лазерного луча. Благодаря высокой направленности лазерного луча можно передавать несколько каналов связи на одной несущей, выбирая всякий раз разные направления в пространстве. Направленность излучения позволяет существенно уменьшить потребление энергии на питание передающего устройства. Кроме того, уменьшается опасность нежелательного перехвата передаваемой информации.

В заключение отметим ту огромную роль, которую стали играть лазеры на рубеже 20-21 веков, в технике хранения информации, такой как оптическая запись на оптический диск (CD/DVD). Высокое качество лазерного воспроизведения, в сочетании с простотой изготовления и дешевизной носителей – компакт-дисков, без преувеличения, совершили переворот в интеллектуальной жизни современного человека. С внедрением CD/DVD – технологии отпадает надобность в огромных хранилищах информации – картотеках, фильмофондах, книгохранилищах и т. п. Весь хранящийся в них колоссальный объем информации теперь уместается на небольшом числе пластиковых компакт-дисков, с которых легко может быть воспроизведен с помощью лазерного луча.

Глава 7 Физика плазмы и управляемый термоядерный синтез

§ 7.1 Плазма и проблема управляемого термоядерного синтеза

Основоположником физики плазмы считается американский ученый Ирвинг Ленгмюр. Именно он дал в 1929 году определение плазмы как особого состояния вещества с высокой степенью ионизации, в обязательном порядке содержащего следующие три компонента:

- 1) оторванные от своих атомов электроны;
- 2) положительные ионы;
- 3) нейтральные атомы (молекулы).

И. Ленгмюр впервые проанализировал подробно физические свойства плазмы и установил, что для описания плазменного поведения достаточно законов классической электродинамики. В частности, как показал Ленгмюр, одним из важнейших свойств плазмы является так называемая квазинейтральность, и установил минимальные пространственные размеры, внутри которых квазинейтральность плазмы может нарушаться (т.н. «радиус экранирования»). В случае локального нарушения квазинейтральности в плазме, согласно Ленгмюру, возникнут колебания плотности, частота которых полностью определяется свойствами самой плазмы – средней концентрацией частиц и температурой.

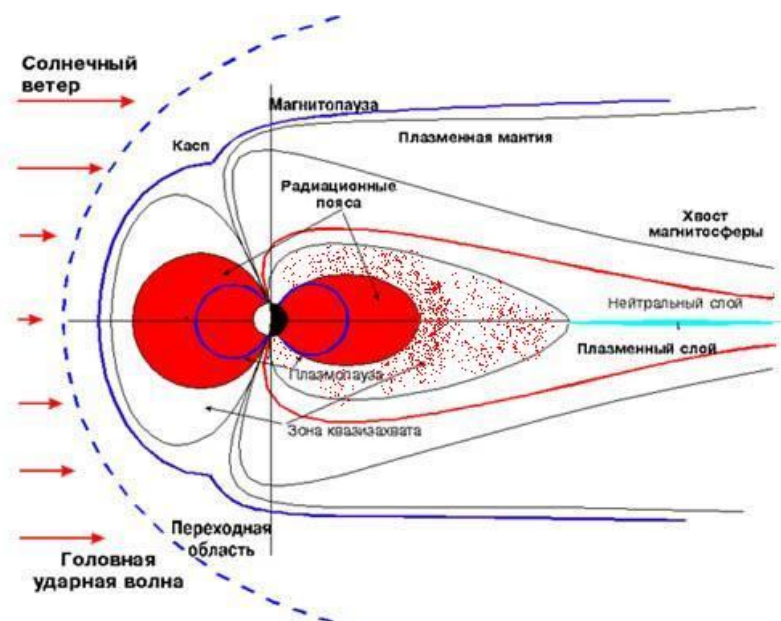


Рисунок 36 – Магнитосфера Земли

Такие колебания получили название плазменных, или ленгмюровских, колебаний.

Плазма – наиболее распространенное состояние вещества в природе. Подсчитано, что 99% (по массе) вещества во Вселенной находится в состоянии плазмы. Это звезды, в том числе наше Солнце, и межзвездный газ. Лишь около 1% вещества приходится на такие объекты Вселенной, как планеты, астероиды и космическая пыль. Наша Земля также окружена плазмой; это верхние слои атмосферы, называемые ионосферой. Исследования, проведенные с помощью искусственных спутников, показали, что плазменное «покрывало» – радиационный пояс, или пояс Ван-Аллена, – надежно защищает все живое на Земле от губительного воздействия жесткого космического излучения. Полярные сияния, молния, искра, пламя костра, светящаяся газоразрядная трубка – все это различные проявления плазмы.

Следует, однако, заметить, что физика плазменного состояния вещества не привлекала большого внимания исследователей до тех пор, пока не выяснилась ее теснейшая связь с проблемой управляемого термоядерного синтеза.



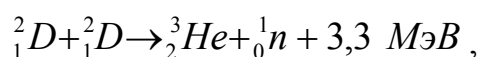
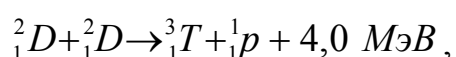
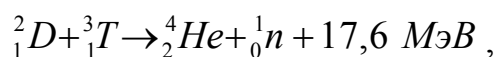
Рисунок 37 – Взрыв самой мощной термоядерной бомбы на Новой Земле. Мощность взрыва 58 мегатонн

Последняя же, в свою очередь, стала актуальной с конца 40-х начала 50-х годов, когда удалось осуществить неуправляемую термоядерную реакцию (взрыв термоядерной бомбы). Для того чтобы понять историю вопроса, остановимся вкратце на физической сути проблемы термоядерного синтеза.

Как известно из курса ядерной физики, существует два принципиально различных способа получения энергии с помощью ядерной реакции. Первый способ основан на выделении энергии при распаде тяжелых ядер на более

легкие осколки – энергия такого рода получается в ядерном реакторе (или атомной бомбе). Вторым способом получения энергии может служить слияние двух или нескольких ядер в одно. Такого рода реакции называют реакциями синтеза. Расчет показывает, что для преодоления кулоновского барьера отталкивания сливающимся ядрам требуется энергия, эквивалентная десяткам миллионов кельвин. Совершенно ясно, что при таких колоссальных температурах вещество может находиться только в состоянии плазмы.

Поэтому, несмотря на то, что в принципе энергию можно извлекать за счет реакции синтеза любых элементов от водорода до железа, трудности преодоления кулоновского барьера заставляют ограничиться на практике лишь реакциями с участием наиболее легких ядер – изотопов водорода, гелия, лития. Вот примеры некоторых из таких реакций синтеза:



Именно такие реакции протекают в водородной бомбе (созданной независимо и практически одновременно, в 1953 году, в СССР и в США). Скорость выделения энергии при термоядерном взрыве огромна: 10^{18} Дж за 10^{-4} с, или 10^{22} Вт. Для практического использования в качестве источника энергии водородная бомба, конечно, не подходит. С другой стороны, известен иной вид термоядерного синтеза – тот, что происходит на Солнце и служит источником его энергии излучения. Расчеты, однако, показывают, что выделение ядерной энергии на Солнце происходит очень медленно: около 20 Вт/м^3 . Это гораздо меньше, чем, например, скорость выделения тепла в теле человека – около 2000 Вт/м^3 , Солнце обладает такой колоссальной температурой – порядка 15 млн. градусов в недрах – только благодаря своим громадным размерам. Ясно поэтому, что прямое воспроизведение солнечного цикла реакций синтеза в лабораторных условиях в качестве источника энергии не имеет смысла. Таким образом, скорость управляемой термоядерной реакции должна быть существенно больше, чем на Солнце, и столь же существенно меньше, чем в

водородной бомбе.

Отметим, что еще в 1934 году под руководством Э.Резерфорда двумя его молодыми сотрудниками – шотландцем М. Олифантом и немцем П. Хартеком – была впервые на опыте осуществлена реакция синтеза нейтронов с образованием трития. Это указывало на принципиальную возможность таких реакций, однако до их массового осуществления с получением заметного количества энергии было очень далеко. В частности, сам Резерфорд в середине 30-х годов утверждал, что не видит какой-либо реальной возможности использовать для нужд человечества внутриядерную энергию. (По иронии судьбы, через год после смерти Резерфорда, в 1938 году, было открыто деление урана нейтронами, положившее начало овладению освобожденной ядерной энергией, – см. об этом главу 4).

Без преувеличения можно сказать, что важнейшей формулой во всех теоретических разработках, связанных с проблемой управляемого термоядерного синтеза является так называемый критерий Лоусона:

$$n\tau \geq \frac{12kT}{(E_{Ch} + \eta E_n) \langle \sigma V \rangle},$$

где n – концентрация заряженных частиц в плазме;

τ – минимальное время удержания плазмы;

k – постоянная Больцмана;

T – температура плазмы;

E_{Ch} – энергия, выделяющаяся в термоядерной реакции в виде энергии заряженных частиц;

E_n – энергия нейтрона;

η – КПД преобразования тепловой энергии нейтрона в электрическую, используемую для последующего подогрева плазмы;

σ – эффективное сечение рассеяния для частиц плазмы и V – скорость заряженной частицы.

Это соотношение было выведено английским физиком Дж. Лоусоном в 1957 году. Для наиболее предпочтительной в практическом отношении

дейтерий-тритиевой реакции правая часть критерия Лоусона имеет минимум при температуре $T = 10^8$ К. Подстановка остальных данных: $\langle \sigma V \rangle = 10^{-22} \text{ м}^3/\text{с}$; $E_{Ch} = 3,5 \text{ МэВ}$; $E_n = 1461 \text{ МэВ}$; $\eta = 30 \%$ приводит к условию: $n\tau \geq 2 \cdot 10^{20} \text{ с/м}^3$. Для реакции D-D условие Лоусона оказывается гораздо более трудно выполнимым: $n\tau \geq 5 \cdot 10^{26} \text{ с/м}^3$.

Чтобы лучше представить приведенные цифры, сделаем следующий мысленный эксперимент. Возьмем смесь дейтерия и трития такой же плотности, как у атмосферного воздуха $n = 2 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$. Тогда из условия Лоусона для реакции D-T ($n\tau \geq 2 \cdot 10^{20} \text{ с/м}^3$) получаем, что время удержания энергии в реакторе должно быть больше 10^{-3} с . На первый взгляд кажется, что это немного. Но при такой плотности ($2 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$) и такой температуре (10^8 К) давление смеси будет составлять несколько сотен тысяч атмосфер. Удержание вещества, раскаленного до ста миллионов градусов, при таком давлении даже и в течение стотысячной доли секунды – сложнейшая проблема, и работа термоядерного реактора при таких условиях будет носить взрывоподобный характер.

Можно поступить иначе: снизить плотность, например, до $2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, тогда давление плазмы будет около 1 атм, но зато время удержания возрастет до 1 с.

Таким образом, перед физиками встал важнейший вопрос: каким образом удержать плазму, имеющую температуру в сотни миллионов градусов, в течение времени, достаточного для получения устойчивого термоядерного процесса с выделением энергии, так, чтобы удовлетворить критерию Лоусона?

§ 7. 2 Идея магнитного удержания

Основополагающая для решения всей проблемы идея об удержании плазмы с помощью магнитного поля была высказана в 1950 году в СССР А.Д. Сахаровым и И.Е. Тамом и в США Л. Спитцером. Рассмотрим более подробно физическую суть этой идеи.

При наложении на плазму внешнего магнитного поля заряженные частицы, составляющие плазму, приходят во вращение («ларморовская прецессия») вокруг направления поля. В результате по поверхности плазмы течет диамагнитный ток (внутри объема плазмы «ларморовские токи» взаимно компенсируются). В результате на плазму, как и на всякий проводник с током в магнитном поле, действует сила. Поскольку диамагнитный ток течет по поверхности плазмы, эта сила приложена к поверхности и направлена внутрь плазмы, где магнитное поле слабее. Можно говорить о «давлении» магнитного поля на плазму; это давление и можно использовать, как показали вышеназванные ученые, для удержания плазмы в магнитном поле. Максимальных значений это давление достигает при максимальной величине диамагнитного тока, когда поле внутри плазмы падает до нуля. Если B – магнитная индукция внешнего поля, то давление со стороны этого поля на поверхность плазмы будет равно:

$$p_B = \frac{10^7}{8\pi} B^2.$$

Если диамагнетизм плазмы недостаточно велик, чтобы полностью вытеснить внешнее поле, так что внутри плазмы остается поле B_1 , то давление на плазму будет определяться разностью давлений магнитного поля по обе стороны границы:

$$p_B = \frac{10^7}{8\pi} (B^2 - B_1^2).$$

Давление самой плазмы, как и обычного газа, равно nkT . Таким образом, на границе плазмы с одной стороны действует давление внешнего магнитного поля, а с другой – сумма давлений плазмы и внутреннего магнитного поля.

Если эти два давления одинаковы, то граница плазмы будет находиться в равновесии при

$$nkT + \frac{10^7}{8\pi} B_1^2 = \frac{10^7}{8\pi} B^2.$$

Эта формула отражает основную идею удержания плазмы магнитным полем. Из

нее видно, что в магнитном удержании плазмы важную роль играет отношение давления плазмы к давлению магнитного поля. Эта величина обозначается β ; она равна:

$$\beta = \frac{8\pi nkT}{10^7 B^2}$$

С ее помощью вышеприведенное условие равновесия можно переписать в виде:

$$\beta + \frac{B_1^2}{B^2} = 1 \Rightarrow \beta = 1 - \frac{B_1^2}{B^2}.$$

С точки зрения экономичности работы термоядерного реактора величину β желательно сделать побольше, чтобы свести к минимуму затраты на создание сильного магнитного поля. Однако, чем больше β , тем труднее обеспечить удержание плазмы, поскольку, когда давление плазмы сравнимо с давлением магнитного поля, движение плазмы существенно сказывается на структуре магнитного поля и, как правило, не в

благоприятную для удержания плазмы сторону. Удержание плазмы магнитным полем возможно только при $\beta < 1$, в противном случае давление плазмы превысит давление магнитного поля, и плазму удержать не удастся.

В соответствии с критерием Лоусона при $n\tau \geq 2 \cdot 10^{20} \text{ с/м}^3$, чтобы работа термоядерного реактора была энергетически выгодна, время удержания плазмы при плотности ионов $3 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ должно быть не менее 0,1 с. Учитывая, однако, что удержание плазмы при $\beta \leq 1$ осуществить очень трудно, обычно принимают с некоторым запасом $\beta \sim 0,1$. Тогда плотность ионов плазмы в реакторе с магнитным удержанием будет равна $3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и, значит, время удержания нужно будет довести примерно до 1 с.

Заметим, однако, что в критерии Лоусона речь идет не просто о времени удержания плазмы, но о времени удержания энергии в плазме. Дело в том, что второе может оказаться существенно меньше первого в силу высокой

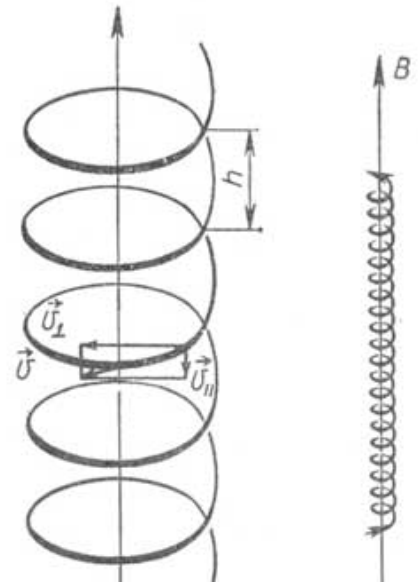


Рисунок 38 – Траектории протона (слева) и электрона (справа) в однородном магнитном поле

теплопроводности плазмы. Эту теплопроводность снижают также с помощью магнитного поля, заставляя частицы плазмы двигаться по кругу.

§ 7.3. Неустойчивости в плазме и борьба с ними

Проще всего создать магнитное поле, удерживающее плазму с помощью электрического тока, текущего прямо по плазме. В этом случае силовые линии магнитного поля могут иметь форму колец, охватывающих плазменный шнур. Если поместить этот шнур внутрь трубы, то магнитное поле надежно изолирует плазму от стенок. Кроме того, протекая по плазме, ток будет ее нагревать и, одновременно, увеличивать давление магнитного поля, удерживающего плазму. Плазменный шнур с протекающим по нему током как бы сам себя сжимает и удерживает. Это явление, названное «пинч-эффектом», было предсказано английским физиком У. Беннетом еще в 1934 году. Однако пинч-эффект характеризуется высокой неустойчивостью плазмы, так как флуктуационное уменьшение диаметра плазменного шнура приводит к увеличению плотности тока на этом участке и, следовательно, к увеличению магнитного давления на плазму и дальнейшему ее сжатию. Это может привести к полному разрыву плазменного шнура и рассеиванию плазмы, что впервые наблюдал А. Уэйр в 1951 году.

Начиная с 50-х годов, теоретики открыли множество других неустойчивостей в плазме. К примеру, в 1948 году англичанин Джон Пирс (и одновременно с ним советские физики А.И. Ахиезер и Я.Б. Файнберг) предсказали так называемую «пучковую неустойчивость», она была обнаружена на опыте в 1957-60 гг. Я.Б. Файнбергом с сотрудниками. В 1949 году американский физик-теоретик Дэвид Бом описал аномально быстрый уход плазмы сквозь магнитное поле на стенки сосуда, получив эмпирическое выражение для коэффициента диффузии («бомовский коэффициент диффузии»). Придумать устройство для удержания плазмы, которое было бы избавлено от всяких неустойчивостей, не удается и по сей день.

Неустойчивости в плазме заставили физиков искать другие способы удержания плазмы магнитными полями. В 1952 году Г.И. Будкер в Советском Союзе, и, независимо от него, Р. Пост и Х. Йорк в США, изобрели ловушку, где для длительного удержания плазмы используется явление отражения заряженных частиц от области с повышенной магнитной индукцией. Конфигурация силовых магнитных линий в такой ловушке напоминает бутылку с двумя горлышками, Г.И.Будкер назвал свою конструкцию ловушкой с «магнитными пробками» или, короче, «пробкотрон». Американцы называли точно такую же ловушку – «системой с магнитными зеркалами».

Сразу же после изобретения систем с магнитными пробками были построены соответствующие установки («Огра», «ПР-1» в СССР и ДСХ в США), на которых начались эксперименты по удержанию плазмы. Оказалось, что время жизни плазмы в ловушке

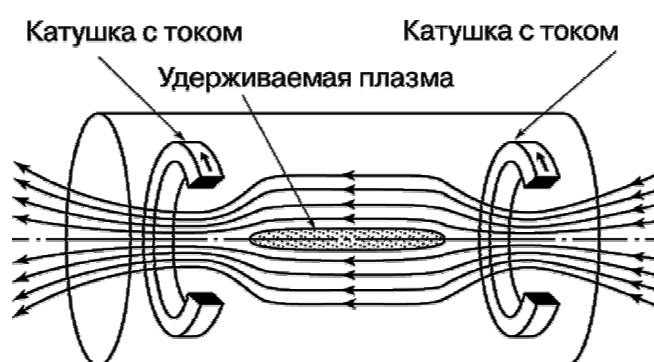


Рисунок 39 – Схема ловушки с «магнитными пробками»

получается значительно меньше ожидаемого. Кроме того, обнаружилось, что большая часть плазмы уходит не через магнитные пробки, а поперек поля на боковые стенки камеры. Такое поведение плазмы, впрочем, было предсказано в 1957 году физиками-теоретиками: Б.Б. Кадомцевым в СССР и, независимо от него, М. Розенблютом и С. Лонгмайром в США. Причина такого «поперечного ухода» плазмы кроется в том самом диамагнетизме плазмы, который и позволяет ее удерживать. Была детально разработана теория такой плазменной неустойчивости (получившей название «желобковой»). Экспериментальные исследования желобковой неустойчивости полностью подтвердили теорию. Это был первый случай, когда довольно сложное поведение плазмы было полностью понято теоретически и имелось прекрасное качественное и количественное согласие между теорией и экспериментом. Результаты исследований по желобковой неустойчивости были доложены на Первой

Международной конференции по физике плазмы и управляемого термоядерного синтеза в Зальцбурге (Австрия) в 1961 году.

Остроумный способ борьбы с желобковой неустойчивостью был предложен в начале 60-х годов группой советских физиков под руководством М.С. Иоффе. Идея заключалась в том, чтобы применить дополнительные проводники с током, – так называемые «палки Иоффе». Шесть таких проводников были расположены по периферии ловушки параллельно ее продольной оси. Направление токов в соседних проводниках чередовалось. Магнитное поле дополнительных проводников складывалось с полем ловушки. В результате индукцию на периферии ловушки можно было увеличить, увеличивая силу тока в проводниках. Опыты по удержанию плазмы на новой установке ПР-5 показали, что «палки Иоффе» работают очень хорошо. Впоследствии в конструкцию пробочной ловушки с «палками Иоффе» был внесен ряд чисто инженерных усовершенствований.

Успехи в работах по удержанию плазмы в пробочных ловушках за последние года выдвинули их в число вероятных кандидатов на роль основы термоядерного реактора. Их главные достоинства – простые конструкции и экономичность; связанная с возможностью удержания плазмы при $\beta < 1$. Для реализации этих преимуществ нужно пройти еще довольно большой путь: за счет улучшения времени удержания предстоит увеличить $n\tau$ примерно в 1000 раз. Однако обилие прогрессивных идей и широкий фронт работ в этом направлении во многих лабораториях мира не оставляют сомнений, что этот путь будет пройден и принципиальная возможность осуществления термоядерного реактора на основе пробочного удержания будет доказана.

§ 7.4. Тороидальные системы: стелларатор

Самый радикальный способ избавиться от потерь плазмы через торцы магнитной ловушки – это вовсе избавиться от торцов, т.е. сделать ловушку тороидальной. Однако простой тор работать в качестве ловушки не будет, поскольку магнитное поле внутри него окажется неоднородным, возрастая к внутренней стенке. В результате плазма в таком поле быстро вылетает через внешнюю сторону тороида (где магнитное поле меньше) на стенку камеры. В 1950 году в СССР и в США был

независимо проведен теоретический анализ движения заряженных частиц в тороидальном магнитном поле. В результате появились две принципиально различные разновидности магнитных тороидальных ловушек: стелларатор и токамак. Остановимся подробнее на принципе действия каждой из них.

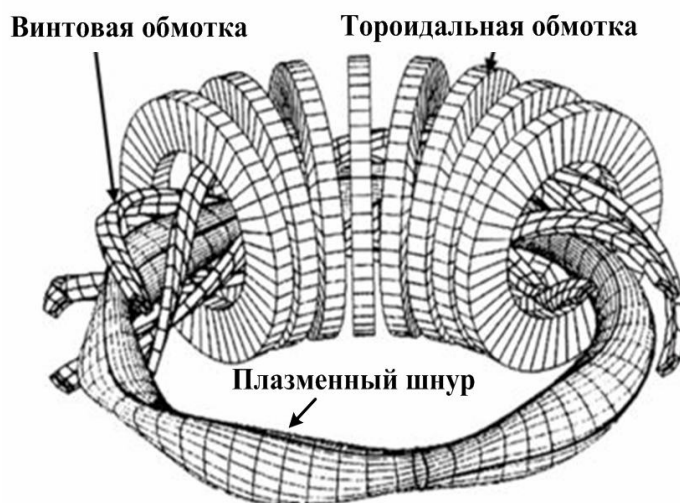


Рисунок 40 – Схема магнитных обмоток и вид плазменного шнура в стеллараторе

В США, как уже говорилось, развитие магнитного удержания началось по инициативе Л.Спитцера. (Лайман Спитцер – известный астрофизик, много занимавшийся движением плазмы в межзвездных магнитных полях) Он предложил свернуть тор в виде аналога ленты Мебиуса. В этом случае заряженные частицы при движении по плазменному шнуру чередуют движение вдоль внешней и вдоль внутренней стенки кольца. В результате нежелательные явления, связанные с неоднородностью поля внутри тора, частично компенсируются. Свою ловушку Л.Спитцер назвал «стелларатором» – «звездным тором», имея в виду, что в такой ловушке должны происходить те же термоядерные реакции, которые идут в недрах звезд. В 1951 году Л. Спитцер разработал целую программу решения проблемы УТС с помощью стеллараторов. Программа была принята, и работа началась. Уже в 1952 году

был построен стелларатор «А», подтвердивший принципиальную возможность удержания электронов в ловушке такого типа. В 1954 году появился стелларатор «В-1» с сильным магнитным полем, обнаруживший целый ряд серьезных проблем. По каким-то непонятным причинам плазма очень сильно взаимодействовала со стенкой. Хотя в начале опыта камера наполнялась чистым водородом, после включения разряда в плазме оказывалось много кремния, кислорода и углерода. Ионы этих примесей ярко светились. Таким образом, вся энергия, которая выделялась при пропускании через плазму электрического тока и должна была по замыслу нагревать плазму до высокой температуры, уносилась с излучением примесей на стенку вакуумной камеры.

Оказалось, что вспышки линий примесей связаны с новым видом неустойчивости, предсказанным незадолго до того английским физиком Н.Крускалом и советским физиком В.Д. Шафрановым. Всякий раз, когда ток разряда превышает так называемый предел Шафранова-Крускала, в плазме развивается резкая неустойчивость: плазма прорывается сквозь магнитное поле, касается стенки, и испарившиеся со стенки атомы примесей, попадая в плазму, начинают ярко светиться.

На последующих моделях стеллараторов серии «В» («В-2», «В-64», «В-65», «В-3») основные усилия ученых были направлены на борьбу с неустойчивостями и примесями, поступавшими в плазму со стенок. В эти годы были поняты многие важные причины работы замкнутых систем, изобретены специальные устройства и приемы работы для борьбы с примесями. Многие из них и по сей день используются не только в стеллараторах, но и в токамаках (см. ниже), и, по-видимому, будут неотъемлемой частью термоядерного реактора на основе замкнутых магнитных ловушек.

Начиная с 1956 года, завеса секретности над исследованиями по термоядерной проблеме была снята. В 1958 году состоялась Вторая Международная конференция по мирному использованию атомной энергии под эгидой ООН. На этой конференции были доложены результаты исследований на стеллараторах серии «В», что вызвало большой интерес у физиков всего мира.

На следующей конференции в Зальцбурге 1961 года, о которой упоминалось выше, по-прежнему доклады по стеллараторам содержали результаты, полученные только на американских установках – стеллараторах серии «В» и начавшем работу стеллараторе следующего поколения «С».

В Мюнхене (Германия) исследования удержания плазмы в стеллараторе начались с повторения американских экспериментов. Первый немецкий стелларатор был довольно мал, хотя и имел такую же, как стелларатор «С», форму – рейстрёка (беговой дорожки стадиона). Радиус закругления был 35 см, вакуумная камера имела диаметр всего 4 см. Винтовое поле создавалось винтовой обмоткой из трех пар проводников. Этот стелларатор (как и все последующие немецкие стеллараторы) получил наименование «Вандельштайн-1», по имени самой высокой в Германии альпийской вершины.

Первые опыты на стеллараторе «Вандельштайн-1» были не слишком удачны – наблюдался удивительно быстрый уход плазмы из ловушки. Немецким теоретикам Пфиршу и Шлютеру удалось разобраться в причинах повышения скорости потерь плазмы при изгибании трубы со стеллараторным полем. Правда, их теория годилась только для достаточно холодной плазмы, но в данном случае опыты как раз и проводились с весьма холодной цезиевой плазмой.

Из теории Пфирша-Шлютера следовало, что винтовая оболочка с тремя парами проводников не обеспечивает нужной скорости прокручивания силовых линий магнитного поля. Ее заменили на двухзаходную винтовую обмотку из двух пар проводников. Эксперименты на новой установке оказались более успешными. Потери плазмы из ловушки стали настолько малыми, что на их фоне стала заметна даже дополнительная гибель плазмы на проволочке диаметром 0,1 мм, которая вводилась в плазму для измерения ее плотности.

В СССР работы по

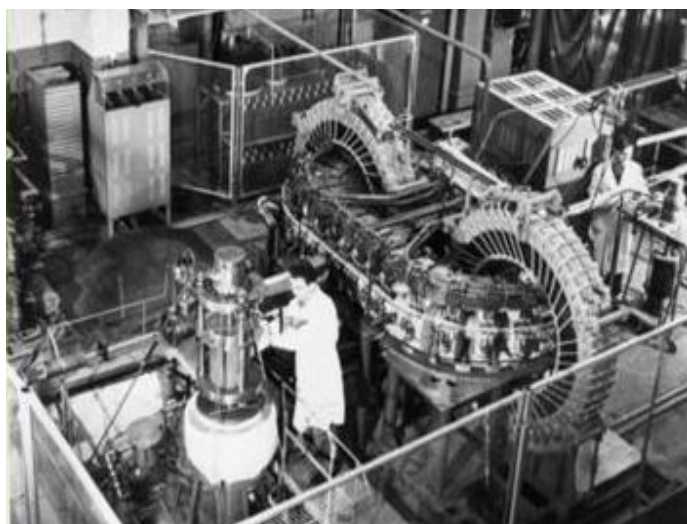


Рисунок 41 – Стелларатор ХФТИ «Сириус»

стеллараторной программе начались в 1962 году. Первый в Советском Союзе стелларатор «Л-1» был построен в Физическом институте им. П.Н. Лебедева Академии наук СССР (ФИАН). В отличие от американских и немецких стеллараторов, советский стелларатор был совершенно круглый, без прямолинейных участков – рейстрексов. Это было сделано для того, чтобы избежать искажений магнитного поля, возникающих в рейстреках. (Вскоре и немецкие физики отказались от рейстрексов) В это же время начались работы по стеллараторной программе в Харьковском физико-техническом институте. В 1964 году здесь вступил в действие стелларатор «Сириус». Он имел форму рейстрека и трехзаходную винтовую обмотку. Изучение структуры магнитного поля в харьковском стеллараторе показало, что в нем действительно образуются замкнутые магнитные поверхности, необходимые для удержания плазмы.

В 1965 году в Англии состоялась Вторая Международная конференция по физике плазмы и УТС. На ней было представлено много работ по стеллараторам, причем результаты, полученные на советских стеллараторах «Л-1» и «Сириус», выглядели значительно лучше, чем данные американского стелларатора «С». Особенно это касалось времени удержания. Вскоре стеллараторами занялись и английские физики, построив свой стелларатор «Клео». Стеллараторная программа приобретала все больший международный размах.

В 1968 году в Новосибирске состоялась Третья Международная конференция по физике плазмы и УТС. Результаты, представленные на этой конференции, можно было разделить на две группы: к одной относятся советские, немецкие, английские эксперименты, к другой – американские. И хотя результаты первой группы выглядели оптимистическими, зато американские результаты заставляли отнестись к конечной перспективе развития стеллараторного направления весьма скептически. Потери энергии в стеллараторе «С» оказались столь велики, что даже с помощью дополнительного и очень мощного радиочастотного нагрева не удавалось получить температуру плазмы выше 1,5 миллионов градусов. А при

дальнейшем повышении температуры, в соответствии с теорией Д. Бома, потери должны были еще возрасти.

Не менее пессимистически для стеллараторной программы прозвучал и теоретический доклад на конференции советских физиков А.А. Галеева, Р.З. Сагдеева и Л.М. Коврижных. Они открыли механизм потери частиц, приводящий к росту скорости гибели плазмы в стеллараторе в несколько десятков раз! Наконец, на этой же конференции группа советских физиков под руководством академика Л.А. Арцимовича доложила о блестящих экспериментальных результатах, полученных на установке другого типа – токамаке «Т-3». Температуру плазмы им удалось довести до 10 миллионов градусов! Это на порядок превосходило наилучшие достижения на стеллараторах.

Все перечисленное привело к тому, что стеллараторная программа была свернута, а все работы по стеллараторам в США прекращены. Самый крупный американский стелларатор «С» было решено переделать в токамак.

§ 7.5. Тороидальные системы: токамак

Наиболее перспективной магнитной ловушкой считается в настоящее время система «ТоКаМаК» (сокращение от «тороидальная камера с магнитными катушками»). Основная идея токамака – сочетание тороидального магнитного поля и возбуждаемого в плазме тороидального тока – была разработана А.Д. Сахаровым в 1951 году. Им же был рассчитан проект термоядерного реактора, удивительно близкий к реальному термоядерному реактору-токамаку, к которому наука пришла лишь после тридцатилетних исследований.

В 1951 году реактор представлялся Сахарову в виде тора большого радиуса $R=12$ м с радиусом плазменного шнура $a = 2$ м. Плазму должно было удерживать магнитное поле с индукцией до 5 Тл. Чтобы устранить дрейф частиц в тороидальном поле и заодно нагреть плазму, предлагалось пропускать

вдоль тора прямо по плазме электрический ток. Как оказалось позднее, магнитное поле такого тока обеспечивает прокручивание силовых линий и действительно решает проблему дрейфа частиц в тороидальном поле. Поэтому реактор, предложенный Сахаровым, если бы его отважились в то время построить, мог бы работать! Во всяком случае, время удержания плазмы в нем было бы достаточно велико. Правда, в то время не было еще получено нужное соотношение между величинами тока и магнитного поля. Кроме того, предложение Сахарова ориентировалось на реакцию $D+D$, а не $D+T$. И вообще в то время о плазме было известно так немного, что строить большую и дорогостоящую установку просто не решились, и данный проект рассматривался лишь как иллюстрация к основной идее магнитного удержания.

Первый токамак под названием «ТМП» был построен в 1956 году. Эксперименты на нем, выполненные под руководством И.Н. Головина и Н.А. Явлинского, по стабилизации прямых разрядов продольным магнитным полем, показали, что эффект стабилизации и в самом деле наблюдается. Однако

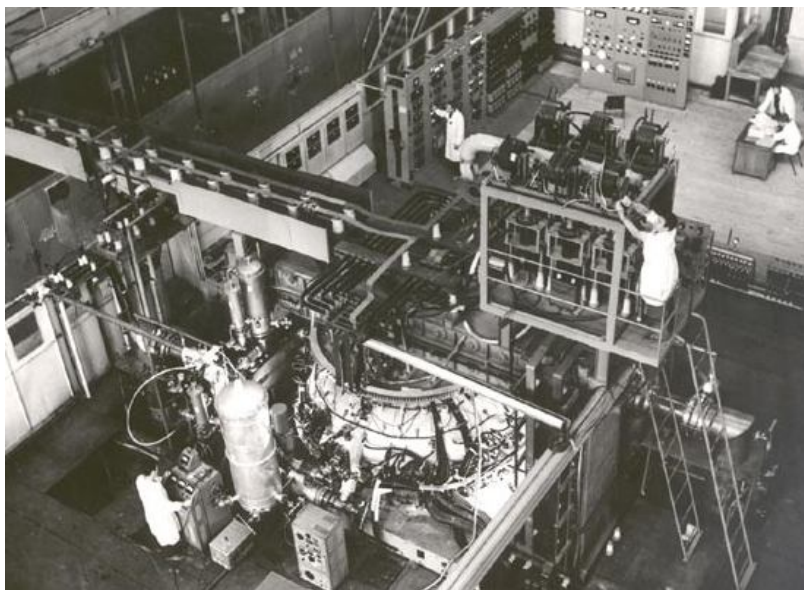


Рисунок 42 – Пуск токамака «Т-4» в 1971 г.

температуру плазмы в нем никак не удавалось поднять выше нескольких сот тысяч градусов – мешало мощное излучение примесей, в первую очередь кремния. Для борьбы с этим была предложена оказавшаяся чрезвычайно удачной идея – делать стенки вакуумной камеры из тонкой нержавеющей стали. Установка получила название «Т-Г» и вошла в строй в 1958 году. Для расширения фронта работ в 60-е годы было построено еще несколько токамаков. среди них выделялся токамак «Т-3», который после ряда

модернизаций («Т-3А», «Т-4») работал до 1978 года.

В это же время интенсивно развивалась теория неустойчивостей плазмы в токамаке. В результате напряженной работы физиков-теоретиков и экспериментаторов таинственное до тех пор поведение плазмы несколько прояснилась. Однако параметры плазмы, достигаемые на опыте, все еще оставались довольно низкими. Хотя с самыми грубыми неустойчивостями плазмы научились бороться, нельзя было сказать, что поведение плазмы контролируется экспериментаторами полностью. Из-за малейших неточностей в подборе управляющих магнитных полей, недостаточной очистки вакуумной камеры, а то и вовсе по непонятным причинам потери энергии из плазмы оставались довольно большими. Несмотря на сотни тысяч ватт вкладываемой мощности, плазму удавалось нагреть только до температуры в несколько миллионов градусов. Время жизни энергии в плазме составляло около одной миллисекунды, чего явно не хватало для зажигания устойчивой термоядерной реакции.

На уже упоминавшейся Третьей Международной конференции по физике плазмы и УТС в Новосибирске (1968 г.) наступил триумф токамаков. Так, на советском токамаке «Т-3» была получена плазма с плотностью $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ – всего лишь в два раза меньше, чем нужно для термоядерного реактора. Температура электронов достигла восьми миллионов градусов, а ионов – пяти миллионов градусов.

После триумфа токамака «Т-3» мода на токамаки прочно захватила все плазменные лаборатории мира. Во всех странах, где велись исследования по термоядерному синтезу, срочно строились токамаки. Первым из токамаков за пределами СССР был токамак «ST» в Принстоне (США). При его сооружении были использованы многие узлы стелларатора «С». Поэтому эксперименты на токамаке «ST» удалось начать уже в 1970 году, а в 1971 году на очередной международной конференции по физике плазмы и УТС в Мэдисоне (США) были доложены результаты.

По своим размерам и конструкции токамак «ST» был полностью подобен

советскому токамаку «Т-3». Свою основную задачу американские физики видели в том, чтобы воспроизвести результаты, полученные на «Т-3». И, надо сказать, им это вполне удалось. Впервые в истории термоядерных исследований данные, независимо полученные на двух разных установках, столь точно совпали. Это означало, что физики, наконец, научились измерять характеристики плазмы и даже отчасти управлять ею. Эксперименты, выполненные на советских токамаках «ТМ-3», «Т-3А», «Т-4», позволили академику Л. А. Арцимовичу вывести свою знаменитую формулу, по которой можно рассчитать температуру ионов в токамаке, если заданы его размеры, значение магнитного поля, плотность плазмы и сила тока в ней.

К концу 70-х годов эксперименты на токамаках привели физиков к заключению, что возможность нагрева током, текущим по плазме, практически исчерпана. С помощью тщательной очистки стенок от примесей, использования диверторов, кропотливого подбора условий разряда удалось довести температуру электронов до 15-20, а ионов – до 10 миллионов градусов. Чтобы двигаться дальше, необходимо было использовать дополнительные методы нагрева. Эксперименты с различными вариантами дополнительного нагрева выявили два наиболее перспективных направления: это нагрев плазмы с помощью высокочастотных полей на частотах циклотронного резонанса для электронов и ионов и нагрев с помощью пучков быстрых нейтральных атомов.

Предварительные опыты показали, что достижение термоядерной температуры с помощью этих методов требует наличия установок мощностью в миллионы ватт. Установки такой мощности очень сложны, их разработка и сооружение связаны с решением целого ряда инженерных проблем и требуют значительных затрат средств и времени. В СССР к концу 70-х годов были достигнуты определенные успехи в разработке высокочастотных генераторов сантиметрового диапазона – гиротронов.

В развитии техники получения нейтральных атомов мегаваттной мощности наибольших успехов добились американские физики в г. Окридже. В начале 1978 года там были разработаны инжекторы пучков нейтральных атомов

с мощностью до 0,9 МВт. Четыре таких инжектора были подготовлены для проведения экспериментов на крупнейшем американском токамаке «PLT», находящемся в Принстоне. Эксперименты на «PLT» проходили так. Вначале, как обычно, зажигался плазменный разряд и плазму нагревали протекающим по ней током примерно до 10 миллионов градусов. Чтобы нагреть ее дальше, в плазму инжесктировали поток быстрых атомов водорода, при этом на «PLT» была достигнута температура в 60 миллионов градусов. Однако по двум важным параметрам результаты «PLT» были неудовлетворительны: плотность плазмы при рекордной температуре была на порядок ниже необходимой, а время удержания в 40 раз меньше секунды.

Исследования плазмы на токамаках в последние десятилетия XX в. занимают центральное место в работах по программе управляемого термоядерного синтеза во всех странах, где эти работы ведутся. Так, на крупнейшем советском токамаке «Т-10» исследовались характеристики плазмы в зависимости от ее плотности, температуры, магнитного поля. Эксперименты, выполненные в начале 80-х годов, показывают, что удержание и частиц, и энергий плазмы в токамаках улучшается с ростом плотности плазмы. Поэтому в будущем реакторе выгодно иметь как можно более плотную плазму. Однако при повышении плотности растет и давление плазмы. Повышение же магнитной индукции требует больших затрат энергии. В силу всего сказанного физики стараются добиться максимально возможного отношения давления плазмы к давлению магнитного поля β . Предварительные расчеты показывают, что создание конкурентоспособного в экономическом плане реактора возможно лишь при значениях β не меньше, чем 5-10%. В токамаках же «Т-10» и «Т-11» величина β составляет 1-2 %.

На токамаке «Т-10» была разработана методика нагрева плазмы радиоволнами. Облучение велось на длине волны 3,6 мм когда частота волны совпадает с частотой прецессии (вращения) электронов в магнитном поле. В этих условиях электроны активно поглощают энергию радиоволн, а затем передают ее ионам. В середине 80-х годов в этих опытах удалось довести

температуру электронов до 30 миллионов градусов при плотности плазмы (4-5) 10^{19} м^{-3} . Таким образом, эффективность нагрева в этих опытах оказалась выше, чем при нагреве плазмы на «PLT» нейтральными пучками.

Большие надежды на достижение нужных для зажигания термоядерной реакции параметров плазмы были связаны с вводом в эксплуатацию крупнейшего советского токамака «Т-15». В этой грандиозной экспериментальной установке объем плазмы достигает 25 м^3 , радиус – 0,7 м. Магнитная система «Т-15» сделана с использованием крупнейшего в мире сверхпроводникового ниобий-оловянного тороидального магнита, для предварительного нагрева и удержания плазмы по его обмоткам течет ток в два миллиона ампер. Дополнительный нагрев плазмы и доведение ее до температуры зажигания осуществляется с помощью пучков быстрых атомов мощностью 10 МВт, и еще 4 МВт мощности «вкладываются» с помощью радиоволн. Эксперименты на токамаке Т-15 внесли значительный вклад в развитие технологий использования сверхпроводящих токонесущих конструкций, развитие диагностических методов и мощного комплекса дополнительного нагрева, включая СВЧ нагрев и нагрев пучками нейтральных атомов.

Сейчас надежды на значительный прогресс в достижении условий для «зажигания» управляемой термоядерной реакции, а, по оптимистичным оценкам, и получении коммерчески выгодной энергетической установки связаны с проектом международного экспериментального термоядерного реактора

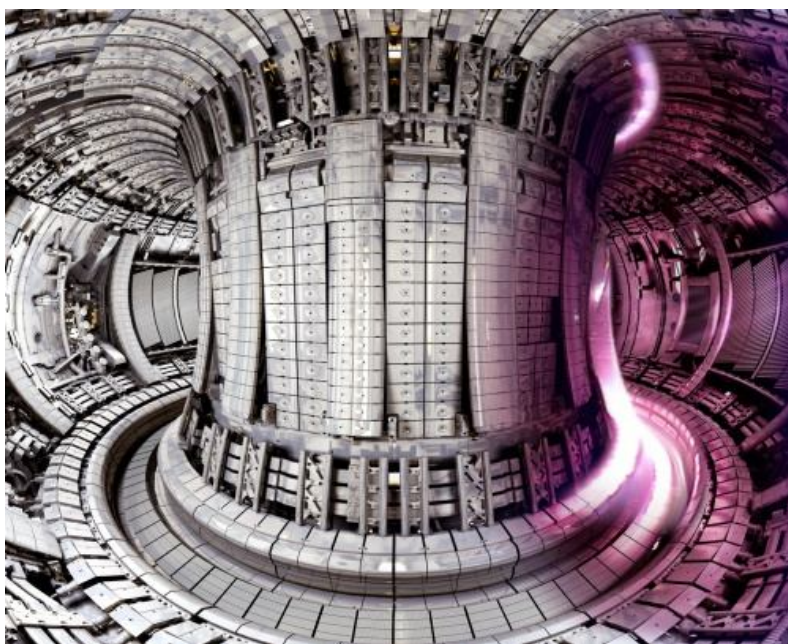


Рисунок 43 – Тороидальная камера токамака «Т -15»

ИТЭР (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER), строящегося в исследовательском центре Кадараш на юге Франции. Задача ИТЭР заключается в демонстрации возможности коммерческого использования реакции термоядерного синтеза и решении физических и технологических проблем, которые могут встретиться на этом пути. Стоимость проекта изначально оценивалась в 5 миллиардов евро, а первые эксперименты планировалось провести в 2016 году, однако постепенно предполагаемая сумма расходов выросла и срок начала экспериментов сдвинулся к 2020 году.

§ 7.6. Возрождение стеллараторов

Неудача 1969 года с американским стелларатором «С» поставила физиков, занимающихся этими системами, в трудное положение. Низкая температура плазмы и неважные перспективы относительно времени удержания выглядели особенно пессимистичными на фоне триумфа токамаков. Стеллараторная программа держалась только на энтузиазме отдельных ученых. Особенно большую роль в спасении стеллараторной программы сыграли советские физики М.С. Рабинович и Л.А. Арцимович. Стеллараторную программу удалось отстоять также в Англии и ФРГ. Так, в ФИАНе под руководством заведующего лабораторией физики плазмы М.С. Рабиновича велись исследования на стеллараторе «Л-1». В середине 70-х годов появились стеллараторы нового поколения, отличающиеся улучшенными характеристиками плазмы.

В 1975 году в ФИАНе был построен стелларатор «Л-2». Примерно в это же время появились установки «Клео» в Англии и «Вандельштайн-7А» в ФРГ. Для создания и нагрева плазмы во всех трех установках использовался ток, текущий по плазме. Несмотря на не слишком большую величину тока (20-30 кА), нагрев плазмы получался весьма значительным: температура плазмы легко достигала нескольких миллионов градусов. Кроме того, эта температура требовала гораздо меньшей мощности нагрева, чем в токамаках. Из этого

следовало, что потери энергии в стеллараторах меньше. Так в докладе на очередной Международной конференции в ФРГ в 1976 году говорилось, что время удержания в стеллараторе значительно больше, чем можно ожидать для токамака. Например, в стеллараторе «Л-2» время жизни энергии получалось в 3-10 раз больше, чем в токамаке «ТМ-3».

За 80-е годы в ряде стран появились новые стеллараторные установки. Так, в СССР были построены стеллараторы «Л-3» в ФИАНе и «Ураган-3» в Харьковском физико-техническом институте. Под воздействием успехов в стеллараторной программе в СССР, Англии, ФРГ американские физики пересмотрели свое негативное отношение к этому типу термоядерных установок и с 1983 года начали энергично возрождать стеллараторную программу. С 1985 года в Японии идут активные исследования на стеллараторе «Гелиотрон-Е».

§ 7.7. Лазерный термоядерный синтез

Выполнить критерий Лоусона можно по-разному. Так, если взять плазму с плотностью 10^{20} м^{-3} , то время ее удержания должно быть не менее 1 с. Однако есть и другой путь. В Институте атомной энергии им. Курчатова в Москве была создана установка «плазменный фокус», в которой плотность достигала $n \sim 10^{24} \text{ м}^{-3}$ и, значит, удерживать плазму было нужно всего лишь в течение десятитысячной доли секунды. Правда, и это весьма непросто: на опыте время удержания получалось на порядок меньше требуемого.

Можно пойти еще дальше по этому пути: взять плазму с плотностью, скажем, $n \sim 10^{29} \text{ м}^{-3}$. Тогда удерживать ее нужно будет всего миллиардную долю секунды. Однако чем удерживать? При такой плотности и при температуре 100 миллионов градусов давление плазмы превысит миллиард атмосфер, и ее не удержит даже магнитное поле, не говоря уж о стенках. Тем не менее, идея такой плотной плазмы, возникшая еще на ранней стадии работ по управляемому термоядерному синтезу, все больше проникала в умы физиков-термоядерщиков.

Еще в конце 40-х годов, когда создавалась водородная бомба (в СССР под руководством А.Д. Сахарова, в США – под руководством Э. Теллера), было обнаружено, что при большой плотности и температуре порядка 100 миллионов градусов, когда давление достигает миллионов атмосфер и плазму ничем не удержишь, она разлетается очень быстро, но все-таки не мгновенно. Мгновенному разлету препятствуют силы инерции, и требуется несколько миллионных долей секунды, чтобы преодолеть действие этих сил. За это время в плазме успевает выделиться колоссальная энергия. Такой способ «удержания» плазмы, когда ее на самом деле ничто не удерживает, получил название инерционного.

Несмотря на изумительную простоту метода инерционного удержания, в первые годы работы над проблемой управляемого термоядерного синтеза о нем практически не вспоминали. Дело в том, что не было способа нагреть плазму до термоядерной температуры за то короткое время, которое дает инерционное удержание. Вернее, был только один способ, – это взрыв уранового заряда, он и использовался в водородной бомбе, т.е. в системе неуправляемого термоядерного синтеза.

Об инерционном удержании вновь вспомнили только в начале 60-х годов, когда появились лазеры. Замечательное свойство лазерного луча – способность концентрировать колоссальную энергию в небольшом объеме за короткий промежуток времени – породило идею использовать лазерный луч для быстрого нагревания небольших крупинок вещества до термоядерной температуры. При этом произойдет что-то вроде микротермоядерного взрыва, но если крупинка будет достаточно мала, то взрыв получится несильным, и его энергию можно будет использовать в практических целях. Эта идея была впервые высказана советскими физиками Н.Г. Басовым и О.Н. Крохиным в 1961 году. В те же годы А.Д. Сахаров теоретически проанализировал возможность лазерного термоядерного синтеза с использованием сжатия сферической мишени. Работы по практическому осуществлению лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) стали активно проводиться в лабораториях ФИАНа под руководством Н.Г.

Басова и А.Н. Прохорова.

Для первых экспериментов по ЛТС в ФИАНе было построено несколько мощных лазеров. Самый мощный среди них состоял из девяти каналов, каждый из которых мог дать вспышку с энергией около 100 Дж. Этот лазер, названный «Кальмаром», в течение нескольких лет оставался самым крупным лазером в мире. Девять пучков от «Кальмара» с помощью системы зеркал подводились к вакуумной камере, в центре которой помещался крохотный шарик-мишень, и с помощью линз все девять пучков прецизионно фокусировались на мишень, чтобы облучить ее равномерно и одновременно со всех сторон. Мишень для первых опытов сделали из полиэтилена, в котором водород замещен дейтерием. Третий в этих экспериментах с небольшой энергией вообще не использовался, поскольку в них не планировалось получение термоядерной энергии. Важно было лишь проверить в принципе, пойдут ли нагрев и сжатие мишени так, как предсказывают расчеты.

Желаемый результат был получен далеко не сразу, но после преодоления ряда трудностей в 1972 году в отдельных «выстрелах» удалось достичь тридцатикратного сжатия полиэтиленовой мишени (диаметр мишени – 0,2 мм). Температура в центре мишени достигла пяти миллионов градусов, а давление – нескольких миллиардов атмосфер. При этих условиях начинались термоядерные реакции – приборы регистрировали рождение нейтронов. Тем самым была подтверждена принципиальная правильность основных идей ЛТС.

Совершенствование как лазеров, так и мишеней для осуществления ЛТС активно продолжается во всем мире. Так, в конце 80-х годов вступила в строй американская установка «Нова» с лазером на 100 кДж, однако этого еще недостаточно, ибо энергия, необходимая для «зажигания» термоядерной реакции с инерционным удержанием, должна быть на порядок выше. Поэтому все большее внимание привлекает идея использовать вместо лазеров мощные ускорители. Особенно большие надежды связаны с развитием ускорителей легких ионов, например лития. На них к середине 80-х годов даже были получены пучки с энергией до 3-4 МДж, что примерно в 2,5 раза меньше, чем

требуется для «зажигания» реакции синтеза.

§ 7.8 МГД-генератор

Как это нередко бывает, в ходе поисков оптимальной конструкции термоядерного реактора специалистам по физике плазмы удалось в качестве «побочного» результата создать новый тип генератора электрической энергии. Этот генератор, получивший название магнетогидродинамического (МГД) генератора, основан на свойстве отклонения заряженных частиц магнитным полем. Струю горячей плазмы (например, вышедшую из термоядерного реактора) пропускают сквозь постоянное магнитное поле, перпендикулярное направлению потока

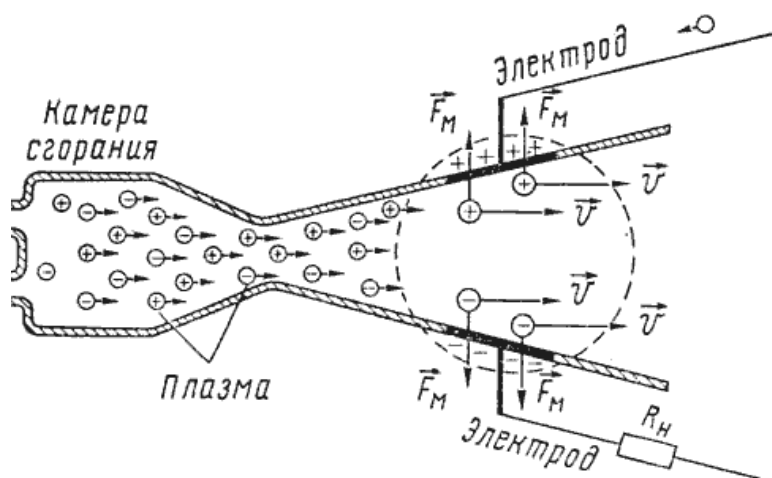


Рисунок 44

плазменных частиц, что приводит к разделению разноименно заряженных частиц на поток электронов и поток ионов, идущих на разные полюса генератора. Поскольку в МГД-генераторе происходит прямое преобразование кинетической энергии заряженных частиц в электрическую и рабочего тела не требуется, КПД таких установок очень высок (может превышать 90%). В 1959 году в нашей стране был создан первый экспериментальный МГД-генератор мощностью 11,5 кВт, а десятилетие спустя под Москвой начала работу первая в мире промышленная МГД-электростанция.

Плазма, выходящая из рабочего канала МГД-генератора, еще имеет довольно высокую температуру (порядка 1500-1800 К). Тепло этой «отработанной» плазмы можно использовать, например, для нагрева паровых котлов, а вырабатываемый в котлах пар будет вращать ротор турбины,

связанный с ротором электрогенератора. Другими словами, наиболее экономное использование энергии достигается при совместной работе МГД-генератора и обычной тепловой электростанции с электромеханическим генератором. Таким образом, следует ожидать, что с появлением промышленных термоядерных установок МГД-электростанции станут их неотъемлемой составной частью.

Глава 8 Физика низких температур

§ 8.1 Сверхтекучесть

Гелий является единственным в природе веществом, остающимся жидким даже при абсолютном нуле температур. Как известно, руководитель знаменитой Лейденской лаборатории в Голландии Г. Каммерлинг-Оннес, первооткрыватель сверхпроводимости, впервые получил жидкий гелий в 1908 году. В дальнейшем ученый неоднократно пытался перевести гелий в твердое состояние. Последняя такая попытка была предпринята им в конце жизни, в 1922 году. Откачивая пар над жидким гелием двенадцатью новыми насосами специальной конструкции (давление пара при этом упало до 0,013 мм. рт. ст.), Каммерлинг-Оннес достиг температуры всего в 0,83 К. Сообщение в печати об этом опыте называлось: «О самой низкой температуре, полученной до сих пор». Но даже при этой температуре, рекордно низкой по тем временам, гелий оставался жидким. С точки зрения классической физики уникальное поведение жидкого гелия совершенно необъяснимо, ибо с понижением температуры тепловые колебания атомов становятся все слабее и слабее. Наличие же сил межмолекулярного сцепления должно приводить, в конце концов, к затвердеванию вещества.

Впоследствии преемник Каммерлинг-Оннеса по Лейденской лаборатории В. Кеезом установил, что гелий может стать твердым лишь при сильном дополнительном сжатии (при температуре абсолютного нуля – около 25 атм). Впервые Кеезом получил твердый гелий в 1926 году. В этом же году П. Дебай предложил принципиально новый метод получения низких и сверхнизких температур, основанный на адиабатическом размагничивании парамагнитных солей. В настоящее время с помощью веществ, обладающих ядерным парамагнетизмом, методом адиабатического размагничивания удается получать температуры в диапазоне милли-, микро-, и даже нанокельвин.

Каммерлинг-Оннес в первом же эксперименте с удивлением обнаружил, что жидкий гелий обладает чрезвычайно малой плотностью: он в восемь раз легче воды! Столь малая плотность означает, что легкие и инертные атомы гелия находятся к тому же на больших расстояниях друг от друга. Перевести такую жидкость в твердое состояние гораздо труднее, чем обычные жидкости. Вблизи же абсолютного нуля его затвердеванию препятствуют квантовые законы, согласно которым представление о полной остановке атомов при абсолютном нуле оказывается неверным.

В 1932 году В. Кеезом и К.

Клаузиус обнаружили, что при температуре $T_C=2,19$ К в гелии наблюдается фазовый переход второго рода. Так, график теплоемкости вблизи этой температуры напоминает греческую букву « λ », и поэтому соответствующая температура получила название λ -точки. При повышении

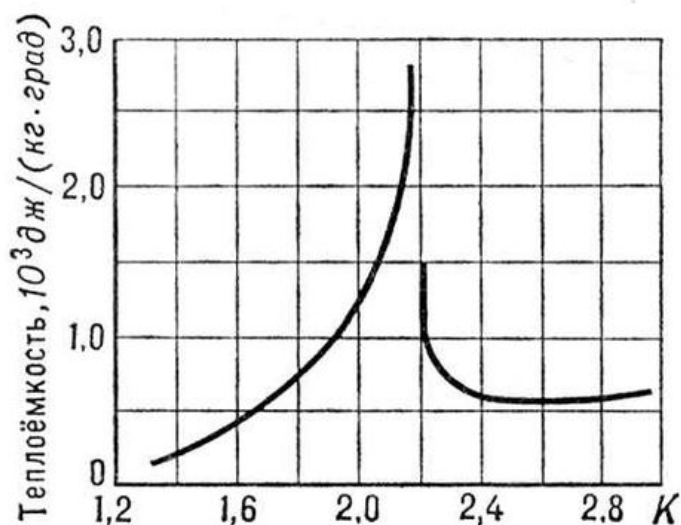


Рисунок 45 – Теплоемкость гелия при сверхнизких температурах

внешнего давления λ -точка смещается в сторону более низких температур. Таким образом, жидкий гелий может находиться в одной из двух фаз, разделенных λ -точкой. Эти фазы получили название He I (выше $T_C = 2,19$ К) и He II (ниже λ -точки). He I представляет собой обычную жидкость. С He II дело обстоит совершенно по-другому: эта фаза характеризуется резкой аномалией физических свойств. Так, в 1938 году П. Л. Капица (1894–1984) в Институте физических проблем в Москве обнаружил, что движение жидкого He II по узкому капилляру или протекание его через щель характеризуется полным отсутствием вязкости. Точнее говоря, было установлено, что при переходе через λ -точку вязкость гелия становится меньше в 10^{11} раз. Капица сделал вывод, что в проведенном эксперименте имеет место полное исчезновение

вязкости у He II . Это явление и получило название сверхтекучести.

Отметим, что явление сверхтекучести во многом напоминает явление сверхпроводимости: в сверхпроводниках заряженная «электронная жидкость» движется сквозь решетку кристалла, не обмениваясь с ней энергией и не испытывая тем самым сопротивления. Жидкий He II также протекает по капилляру без сопротивления, т.е. без трения. Сверхтекучесть «моложе» сверхпроводимости почти на 30 лет. Однако, если между открытием сверхпроводимости (1911 г.) и созданием его микроскопической теории (1957 г., о чем ниже) прошло почти полвека, то со сверхтекучестью дело обстоит иначе. Природа явления стала понятной уже через три года после его обнаружения, в 1941 году, когда Л.Д. Ландау (1908 – 1968) построил теорию сверхтекучести.

Первым важным шагом на пути к пониманию природы сверхтекучести явилась двухжидкостная модель He II , предложенная в 1938 году венгерским физиком-теоретиком Л. Тиссой. В основе этой модели лежит предположение, что He II состоит из двух компонент: нормальной и сверхтекучей. При абсолютном нуле существует только сверхтекучая, а при $T > 2,19 \text{ K}$ – только нормальная компонента. С помощью двухжидкостной модели удалось объяснить те весьма нетривиальные результаты, которые получил Капица в опытах с жидким гелием. Однако модель Тиссы все же страдала рядом серьезных недостатков. Так, например, она не могла объяснить тот факт, что никакими способами нельзя отделить «нормальные» атомы гелия от «сверхтекучих», то есть все атомы гелия абсолютно тождественны. Впоследствии стало ясно, что следует говорить не о существовании двух компонент He II (как это делается в двухжидкостной модели), а об одновременном сосуществовании двух движений – нормального и сверхтекучего. При этом нормальное движение обладает всеми свойствами вязкого («обычного») течения жидкости, тогда как второй вид движения приводит к явлению сверхтекучести. Двухжидкостная модель (со сделанными оговорками) предполагает также, что сверхтекучее движение в He II не только

не сопровождается вязкостью, но и не принимает участия в переносе тепла.

Двухжидкостная модель Тиссы только описывает, но отнюдь не объясняет явление сверхтекучести. Полное теоретическое обоснование двухжидкостной модели и явления сверхтекучести Не II в целом было осуществлено Ландау в 1941 году. К этому времени Ландау заведовал теоретическим отделом в Институте физических проблем, возглавляемом Капицей. Теория Ландау исходит из того, что жидкий Не II при абсолютном нуле находится в основном, т.е. низшем энергетическом квантовом состоянии. Атомы гелия в этом состоянии не могут поглощать порции энергии меньше чем kT_C . Так как при движении какого-либо тела в Не II энергия их поверхностного взаимодействия существенно меньше этого значения, то передачи энергии (и, следовательно, импульса) от тела к атомам жидкости не происходит, то есть трение отсутствует. Для возникновения трения необходимо, чтобы Не II при движении тела переходил в возбужденное состояние, но так как между атомами жидкого гелия существует специфическое квантовое взаимодействие, то возбужденное состояние должно быть коллективным, т.е. относиться ко всему гелию, а не к возбуждениям изолированных атомов. Такой характер возбуждения связан с квантовым поведением коллективов тождественных частиц-бозонов (в данном случае атомов гелия).

В 1962 году королевская академия наук Швеции высоко оценила работу, присудив Л.Д. Ландау Нобелевскую премию по физике. П.Л.Капица был удостоен Нобелевской премии за открытие явления сверхтекучести в 1978 году.

§8.2 Создание микроскопической теории сверхпроводимости

В 1933 году немецкие физики В. Майснер и Р. Оксенфельд открыли одно из наиболее фундаментальных свойств сверхпроводимости – эффект Майснера. Оказалось, что магнитное поле не проникает в толщу сверхпроводящего образца. Так в любом металлическом образце при температуре выше критической при включении внешнего магнитного поля в

его объеме возникнет индукция магнитного поля отличная от нуля. Если, не выключая внешнего магнитного поля, постепенно понижать температуру, то в момент перехода металла в сверхпроводящее состояние магнитное поле из него будет как бы «вытолкнуто» и его индукция внутри образца станет равной нулю. Это соответствует тому, как если бы магнитная проницаемость сверхпроводника резко обратилась в нуль. Другими словами, имеет место эффект полного диамагнетизма.

Механизм возникновения идеального диамагнетизма у сверхпроводников следующий. При помещении сверхпроводящего образца во внешнее магнитное поле в поверхностном слое металла возникает стационарный электрический ток, собственное магнитное поле которого противоположно приложенному полю, что в результате и приводит к

нулевому значению поля в объеме образца. Внешнее магнитное поле, вызывающее стационарный электрический ток, как известно, никакой работы над заряженными частицами не совершает. Электрическое поле, которое в обычных металлах совершает работу и тем самым поддерживает постоянство электрического тока, в данном случае отсутствует. Следовательно, идеальный диамагнетизм сверхпроводников означает возможность протекания поверхностного стационарного тока, не испытывающего электрического сопротивления. Наличие сопротивления привело бы к тепловым потерям и, в отсутствие электрического поля, к быстрому затуханию тока.

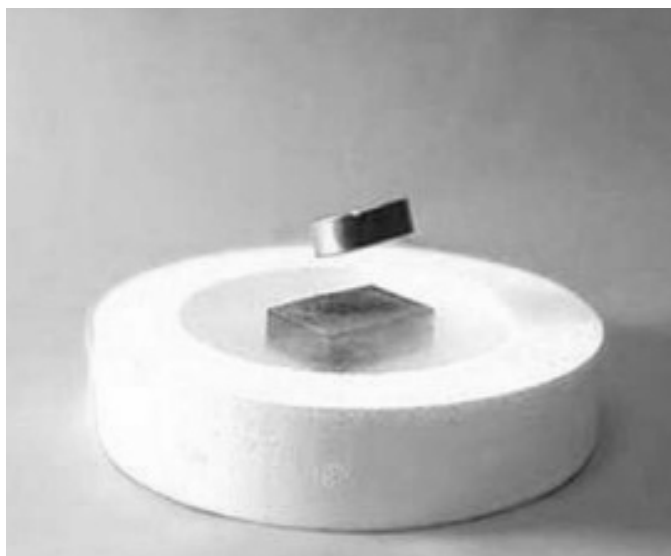


Рисунок 46 – Наглядное «следствие» эффекта Майсснера – магнитная левитация

Эффект Майсснера и явление сверхпроводимости, т.е. полное отсутствие сопротивления, тесно связаны между собой и являются следствием общей закономерности, которую и установила теория сверхпроводимости.

Магнитное поле, как уже было сказано, не проникает в объем сверхпроводящего образца. Это не относится к поверхностному слою, в котором наблюдается отличная от нуля напряженность магнитного поля. Именно в этом слое и протекают незатухающие токи, которые экранируют от влияния внешнего поля области, удаленные от поверхности. Таким образом, металл можно перевести из сверхпроводящего в нормальное состояние, не повышая его температуры, а воздействуя на сверхпроводник магнитным полем. На первый взгляд может показаться, что ток в сверхпроводнике идеально подходит для получения сильных магнитных полей. Действительно, в обычном проводнике большая часть мощности тока уходит на тепловые потери, а при увеличении тока металл может просто расплавиться. В сверхпроводниках же из-за отсутствия сопротивления этой опасности нет. Поэтому, казалось бы, при увеличении сверхпроводящего тока можно получить любое требуемое значение магнитного поля. Однако как только поле достигает своего критического значения, сверхпроводимость разрушается, и вся энергия магнитного поля (связанного с током) скачкообразно переходит в тепло. Впоследствии, однако, был обнаружен класс веществ, сохраняющих свойство сверхпроводимости в мощных магнитных полях и при сильных токах: эти вещества получили название сверхпроводников второго рода (в отличие от сверхпроводников первого рода, о которых говорилось выше). Но мы здесь не будем вдаваться в эти подробности.



Рисунок 47 – Диаграмма фазового перехода в сверхпроводящее состояние при наличии магнитного поля

В 1934 году К. Гортер и Х. Казимир предложили «двухжидкостную»

модель сверхпроводника, во многом аналогичную двухжидкостной модели сверхтекучего гелия II (см. п. 1 данной главы). Согласно модели Гортера и Казимира, электронная жидкость в сверхпроводнике представляет собой совокупность двух жидкостей – «нормальной» и «сверхпроводящей». «Нормальная» компонента является ничем иным как обычными электронами, тогда как «сверхпроводящая» ответственна за новые, аномальные свойства металла. С понижением температуры количество «сверхпроводящей» компоненты возрастает, плотность же «нормальной» электронной жидкости убывает и при абсолютном нуле исчезает совсем. В точке фазового перехода $T = T_C$ исчезает «сверхпроводящая» компонента электронной жидкости.

«Двухжидкостная» модель объясняет, по крайней мере качественно, основные особенности теплопроводности в сверхпроводниках. Если в нормальном металле число электронов, участвующих в теплопередаче, не меняется при изменении температуры, то в сверхпроводниках ответственная за теплопроводность «нормальная» компонента уменьшается с понижением температуры. Уменьшение числа переносящих энергии частиц естественным образом приводит к уменьшению теплопроводности с убыванием температуры, что и наблюдалось на опыте.

Здесь следует сделать ту же оговорку, что и в предыдущем случае, когда речь шла о двухжидкостной модели для гелия II. А именно, на самом деле электрон не может быть «нормальным» или «сверхпроводящим», правильнее было бы говорить о двух типах движения, которые могут существовать в электронной жидкости. К «двухжидкостной» модели поэтому следует относиться как к удобному методу, позволяющему наглядно представить сложные процессы, происходящие в сверхпроводнике. Однако подлинное понимание этих процессов стало возможно только после создания микроскопической теории сверхпроводимости.

Серьезную трудность на пути построения теории сверхпроводимости по аналогии с теорией сверхтекучести гелия II представляло то обстоятельство, что, в отличие от атомов гелия, электроны являются ферми-частицами, т.е.

имеют полуцелый спин. Следовательно, нельзя говорить о бозе-конденсации электронов в сверхпроводнике, тогда как в He II это явление и приводит к сверхтекучести. Важным моментом на пути преодоления указанной трудности явилось открытие изотопического эффекта, экспериментально обнаруженного американскими физиками Э. Максвеллом и К. Рейнольдс в 1950 году на изотопах ртути и олова. Этот эффект наблюдается у чистых сверхпроводников, имеющих несколько изотопов. Оказалось, что для кристаллических решеток, построенных из различных изотопов одного и того же элемента, выполняется соотношение

$$T_C \sim \sqrt{M},$$

где T_C – температура перехода в сверхпроводящее состояние, M – массовое число атомов, из которых построена кристаллическая решетка. Поскольку масса M определяет частоту колебаний решетки: $\omega = \sqrt{k/M}$, то изотопический эффект заставляет предполагать, что сверхпроводимость обусловлена взаимодействием электронов с колебаниями кристаллической решетки.

Открытие изотопического эффекта позволило выбрать правильное направление в построении микроскопической теории сверхпроводимости. Начало было положено в 1950 году английским физиком Гербертом Фрелихом, теоретически предсказавшим изотопический эффект практически одновременно с его экспериментальным обнаружением. После основополагающей работы американского теоретика Леона Купера (1956 г.) была снята основная трудность, упоминавшаяся выше, – бозе-конденсация электронов в сверхпроводнике. Как показал Купер, электроны в сверхпроводнике при

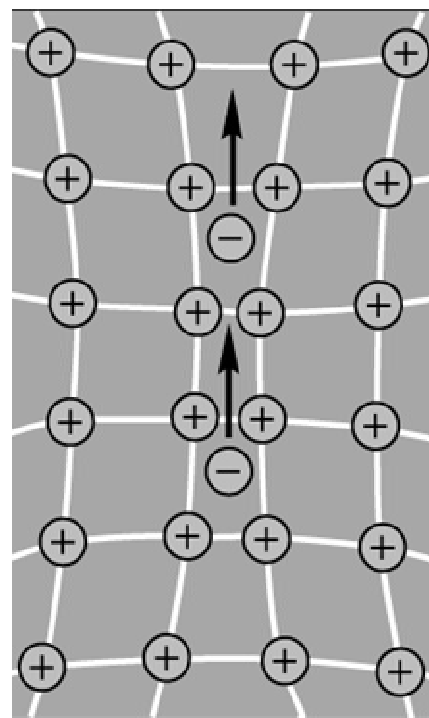


Рисунок 48 – Схема спаривания двух электронов посредством их взаимодействия с атомами решетки металла

сверхнизких температурах объединяются в пары и тем самым становятся коллективом квазичастиц с целым спином, способных к бозе-конденсации. Куперовские пары и являются аналогом атомов He II.

В 1957 году американскими физиками-теоретиками Д. Бардином, Л. Купером и Дж. Шриффером была построена последовательная микроскопическая теория сверхпроводящего состояния, получившая наименование теории БКШ. Отличный от развитого в теории БКШ новый метод в теории сверхпроводимости был разработан советским теоретиком Н.Н. Боголюбовым в 1958 году. Тем самым загадка сверхпроводности была разрешена.

Основная мысль авторов БКШ-теории состоит в том, что благодаря интенсивному взаимодействию с колебаниями решетки между двумя электронами (при температуре ниже T_C) возникает своеобразное притяжение, что и приводит к образованию пары. Бозе-эйнштейновский конденсат из спаренных электронов составляет «сверхтекучую» компоненту электронной жидкости. Другими словами, спаривание электронов, а значит, и само явление сверхпроводимости является результатом электрон-фононного взаимодействия.

Потенциальная энергия притяжения отрицательна, и спаривание двух электронов понижает их энергию, благодаря чему образуется энергетическая щель между спаренными электронами и неспаренными (между основным и первым возбужденным энергетическими состояниями). Энергетическая щель уменьшается при приближении к критической температуре T_C и обращается в нуль при $T = T_C$. Наличие энергетической щели в сверхпроводнике на опыте наблюдалось в 1953 году Б. Гудманом, а затем в 1960 году А. Гиавером. В последнем случае было открыто туннелирование электронов из сверхпроводника через изоляционный барьер в другой металл; тем самым был создан сверхпроводящий туннельный диод. О туннельном эффекте в сверхпроводнике будет подробно рассказано ниже; здесь мы только отметим, что опыты Гиавера явились серьезным экспериментальным подтверждением теории БКШ.

Все три автора микроскопической теории сверхпроводимости были удостоены в 1972 году Нобелевской премии по физике (таким образом, американский физик Джон Бардин стал единственным пока в истории науки дважды лауреатом Нобелевской премии по физике). А. Гиавер получил Нобелевскую премию год спустя.

§ 8.3 Макроскопическое квантование

Одно из основных положений квантовой механики состоит в том, что целый ряд физических величин, таких как энергия, момент импульса и другие, в определенных условиях квантуются, то есть могут принимать только дискретный ряд значений. Но до недавнего времени считалось, что квантование касается только микромира, – оно свойственно процессам, происходящим в атомах, атомных ядрах и т.п. В самом деле, при изучении микроскопических систем мы имеем дело с громадным числом частиц. И хотя поведение каждой отдельной частицы описывается законами квантовой механики, в целом в макроскопическом образце квантование энергии, момента импульса и других физических величин не проявляется из-за хаотического теплового движения частиц. Тепловое движение маскирует квантовые закономерности.

Однако изучение некоторых явлений, наблюдаемых при температурах, близких к абсолютному нулю, показало, что возможно и макроскопическое квантование, т.е. квантование величин, характеризующих макроскопические объекты, размеры которых в сотни тысяч раз больше атомных. Вблизи абсолютного нуля, когда тепловое движение не играет значительной роли, оказывается возможным непосредственное наблюдение квантовых закономерностей.

В 1950 году Фриц Лондон проанализировал следующий мысленный эксперимент. Возбудим в металлическом кольце электрический ток. При комнатных температурах ток в кольце будет быстро затухать – в силу тепловых потерь, которыми сопровождается протекание тока. Совершенно иная картина

должна наблюдаться в случае, когда температура близка к абсолютному нулю и металл является сверхпроводником. Ток, протекающий в этих условиях по кольцу, становится незатухающим. Согласно теории Ф. Лондона, излучение электромагнитных волн в этом случае не возникает по той же причине, по которой не излучает электрон, движущийся вокруг атомного ядра в модели Резерфорда-Бора. В обоих случаях основную роль играют законы квантовой физики. Но если при изучении свойств атома мы сталкиваемся с квантованием в микромире, который не можем наблюдать непосредственно, то сверхпроводимость дает нам пример квантования макроскопической величины – силы тока. Так с помощью сверхпроводящего кольца мы можем наблюдать гигантский по своим масштабам эффект.

Как показал Ф. Лондон, сила тока в сверхпроводящем кольце не может принимать любое численное значение и изменяться непрерывно. Для всего электронного коллектива, движущегося по кольцу, возникает гигантская боровская орбита. Поскольку сверхпроводящий ток связан с магнитным полем, то и напряженность поля может принимать лишь дискретный ряд значений. Следовательно, будет квантоваться и магнитный поток через кольцо. Ф. Лондон вычислил квант магнитного потока Φ_0 . Интересно, однако, то, что поскольку Ф. Лондон делал свой расчет еще до создания микроскопической теории сверхпроводимости, то он получил для Φ_0 ровно вдвое большую величину, чем дает эксперимент, поставленный в 1961 году (У. Дивер и У. Фейрбенк, Р. Долл и М. Набауэр). Это расхождение объясняется спариванием электронов в сверхпроводнике. Таким образом, опыт по квантованию магнитного потока явился еще одним убедительным подтверждением теории БКШ. В упомянутых опытах сверхпроводящий ток возбуждался в оловянной трубочке длиной 1 см и внутренним диаметром $1,5 \cdot 10^{-3}$ см. Благодаря малости диаметра при возбуждении всего одного кванта магнитного потока Φ_0 получается уже макроскопически измеряемое магнитное поле $H=0,117$ Гс, которое всего в пять раз слабее магнитного поля Земли. Это поле измерялось катушками, помещенными возле концов трубочки, совершавшей колебания

вдоль своей оси. В эксперименте действительно было обнаружено, что магнитный поток может принимать только дискретный ряд значений и в связи с этим ток тоже меняется только скачкообразно.

Любопытно, что описанный эксперимент позволяет определить численное значение постоянной Планка, что, как известно, делается только с помощью методов атомной, микроскопической физики. Явление сверхпроводимости, сугубо квантовое по своей природе, позволяет определить постоянную Планка из наблюдения чисто макроскопического явления.

§ 8.2 Эффекты Джозефсона

В 1962 году молодой английский физик-теоретик Брайан Джозефсон в своей диссертационной работе предсказал существование двух необычных эффектов. Эффекты эти вскоре были обнаружены экспериментально, и их изучение интенсивно продолжается и в настоящее время. Б. Джозефсон доказал, что, во-первых, через тонкий диэлектрический контакт, разделяющий два сверхпроводника, сверхпроводящий ток может протекать и при отсутствии разности потенциалов на контакте, и, во-вторых, при наличии постоянной разности потенциалов через контакт протекает переменный ток. Первый эффект получил названия стационарного эффекта Джозефсона, второй – нестационарного.

Ясно, что эти явления отличаются от тех, которые наблюдали Л. Эсаки и А. Гиавер (см. выше), хотя они также осуществляются посредством прохождения электронов через туннельный барьер. Различие заключается в том, что эффекты Джозефсона вызваны туннелированием сверхпроводящих электронных пар, а в опытах Эсаки и Гиавера наблюдалась туннелирование одиночных электронов.

Эффекты Джозефсона обусловлены двумя обстоятельствами, фазовой когерентностью сверхпроводящих электронных пар, непосредственно вытекающей из теории БКШ, и тем, что электронные пары в сверхпроводнике

являются бозонами. В результате, как показал Джозефсон, в движении электронных пар должны наблюдаться явления, аналогичные явлениям интерференции взаимно когерентных волн в оптике. При наличии сверхпроводящего тока по обе стороны контакта в сверхпроводнике существуют взаимно когерентные волны куперовских пар с одинаковой частотой. Ясно, что при туннелировании через контакт энергия, а, следовательно, и частота куперовской пары не изменяются, изменяется лишь фаза. Поэтому, как показал в своей работе Б. Джозефсон, прошедшая через контакт волна интерферирует с волной на другой стороне контакта. Сила тока, прошедшего через контакт, зависит от разности фаз.

В наиболее благоприятных условиях интерференции ток достигает максимального значения, которое определяется свойствами контакта и, в первую очередь, его толщиной. Таким образом, через контакт при нулевой разности потенциалов между его сторонами течет постоянный сверхпроводящий ток. В этом и состоит стационарный эффект Джозефсона, он был экспериментально зарегистрирован в 1963 году Ф. Андерсоном и Дж. Роуэллом.

Нестационарный эффект Джозефсона объясняется возникающими биениями при интерференции взаимно когерентных волн с близкими частотами. При прохождении контакта, к которому приложена разность потенциалов U , энергия куперовской пары изменяется на величину $2eU$ и, следовательно, на другой стороне контакта происходит интерференция двух взаимно когерентных волн, частоты которых отличаются на $2eU/\hbar$. При интерференции возникают биения амплитуды суммарной волны с частотой

$$\nu = \frac{2eU}{\hbar},$$

которые означают, что через контакт протекает переменный ток указанной частоты. В этом и состоит нестационарный эффект Джозефсона. Впервые он был обнаружен на опыте А. Гиавером в 1964 году. Напряжению $U=1$ мкВ в этом опыте соответствовала частота 483,6 МГц – как и предсказывалось

теорией. Независимо от Гиавера, нестационарный эффект Джозефсона был зарегистрирован в Харькове И.К. Янсоном, В.И. Свистуновым и И.М. Дмитренко. Любопытно, что Нобелевская премия была вручена в 1973 году одновременно Б. Джозефсону и А. Гиаверу.

Впоследствии выяснилось, что для существования эффектов Джозефсона не обязательно создавать контакт из диэлектрика. Аналогичный эффект наблюдается, когда проводники соединены тонкой перемычкой (мостиком или контактом) или тонким слоем металла в нормальном состоянии или полупроводника. Такие связи между сверхпроводниками получили название «слабых». Сверхпроводники вместе со слабыми связями между ними называют слабосвязанными сверхпроводниками.

Переменный ток на контакте испускает кванты с энергией $2eU$, которые можно детектировать. Следовательно, оказывается возможным с большой точностью изучить зависимость частоты излучения от разности потенциалов и вычислить с той же точностью значение e/\hbar . Отношение этих двух фундаментальных констант указанным методом найдено с точностью, которая значительно превосходит точность измерения другими методами, поскольку частота является точно измеряемой величиной. Имеет место и обратный эффект: при поглощении излучения на контакте возникает дополнительная разность потенциалов.

В строгой теории эффекта Джозефсона показывается, что при увеличении магнитного потока, пронизывающего кольцевой контур со сверхпроводящим током, ток, протекающий через слабосвязанный сверхпроводник, испытывает колебания с периодом кванта магнитного потока Φ_0 (см. выше). Это позволяет использовать такие устройства («сквиды») для чрезвычайно точного измерения слабых магнитных полей (до 10^{-18} Тл) и малых токов (до 10^{-15} А). Слабосвязанные сверхпроводники используются также в качестве быстродействующих элементов логических устройств ЭВМ, детекторов СВЧ, в усилителях и других электронных приборах.

§8.5 Высокотемпературная сверхпроводимость

Многие годы заветной мечтой физиков, работающих со сверхпроводящими материалами, было достижение более высоких температур перехода в сверхпроводящее состояние, по крайней мере, приближающихся к температуре жидкого азота (80 К). В этом случае имела бы место так называемая «высокотемпературная сверхпроводимость», что означало бы самую настоящую революцию в технике. По сути дела, мы получили бы электротехнику без потерь.

Однако долгое время попытки хотя бы немного поднять критическую температуру сверхпроводников приводили лишь к очень незначительному ее повышению для некоторых весьма специфических сплавов. Так, в 1973 году был создан сверхпроводящий сплав с критической температурой 23,2 К. Разумеется, этот сверхпроводник никак не мог быть назван «высокотемпературным».

Прорыв произошел весной 1986 года, когда немецкие физики Г. Беднорц и А. Мюллер сообщили об открытии ими сверхпроводимости в соединении оксида лантана, бария и меди с критической температурой примерно 33 К. Наиболее важным в этом открытии было не повышение критической температуры на 10 К после тринадцати лет безуспешных попыток повысить ее хотя бы на 1 К, а обнаружение новых сверхпроводящих материалов, относящихся к керамикам. Исследование керамических материалов позволило американскому экспериментатору Р. Чу уже через полгода открыть сверхпроводимость оксида иттрия, бария и меди с критической температурой выше 90 К. Это открывало возможность крупномасштабных технологических применений сверхпроводимости выше точки кипения азота (77 К), когда эти применения становятся экономически оправданными. После этого в область высокотемпературной сверхпроводимости устремилось большое число исследователей во всех странах. В 1987 году в физических журналах было опубликовано свыше 1000 работ по этим вопросам, проведено несколько

конференций, совещаний и т.д. Осенью 1987 года (неслыханно быстро!) Беднорцу и Мюллеру за открытие высокотемпературной сверхпроводимости была присуждена Нобелевская премия по физике.

В работах 1987 года были установлены важные экспериментальные факты: высокотемпературная сверхпроводимость свойственна материалам с содержанием меди; она обусловлена спаренными носителями зарядов (дырками); она очень чувствительна к содержанию кислорода в материалах и не допускает замещения меди другим элементом; исследования изотопического эффекта ставят под вопрос фононный механизм спаривания.

В течение 1988 года в работах по высокотемпературной сверхпроводимости приняла участие значительная часть физиков, ранее занятых в других областях исследования. Этим работам во всех развитых странах были предоставлены значительные финансовые средства. Исследование десятков тысяч соединений на основе меди позволило найти новые сверхпроводящие материалы и поднять критическую температуру до 125 К. При этом во всех полученных сверхпроводниках носителями заряда являются дырки. Интенсивные теоретические исследования не позволили получить какие-либо надежные результаты по выяснению механизма наблюдаемой высокотемпературной сверхпроводимости. Таким образом, в исследованиях высокотемпературной сверхпроводимости в течение 1988 года не произошло каких-либо принципиальных событий. Принципиальное событие произошло в январе 1989 года, когда группа японских ученых из Токийского университета объявила об открытии нового класса сверхпроводников с критической температурой 20 К. В отличие от известных до этого керамических сверхпроводников на основе меди, открытых Беднорцем и Мюллером, носителями заряда у нового класса сверхпроводников служат не дырки, а электроны. Важность этого открытия связывается с надеждами построить правильную теоретическую модель для сверхпроводников на основе меди и найти сверхпроводящие материалы с критической температурой выше 125 К.

Сверхпроводники Беднорца-Мюллера с химической формулой $\text{La}_{2-x}(\text{Ba},\text{Sr})_x\text{CuO}_{4-y}$ были получены в результате частичного замещения в соединении La_2CuO_4 трехвалентного лантана двухвалентным барием или стронцием. Полученный японскими физиками электронный сверхпроводник имеет состав $\text{Ln}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$, где в качестве лантаноида Ln может быть один из легких трехвалентных лантаноидов – празеодим, неодим или самарий, т.е. в соединении Ln_2CuO_4 один из указанных легких лантаноидов замещается также легким лантаноидом – церием. Вскоре после японского сообщения группа исследователей университета Калифорнии, Сан Диего, объявила об электронной сверхпроводимости в соединениях $(\text{Nd},\text{Pr})_{2-x}\text{ThCuO}_{4-y}$ и $\text{Eu}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$. Это показывает, что электронные сверхпроводники получаются в результате частичного замещения в соединении вида LnCuO_4 трехвалентного лантаноида четырехвалентным.

Кристаллическая структура электронных сверхпроводников аналогична структуре дырочных сверхпроводников Беднорца-Мюллера. Единственное отличие их состоит в том, что в электронном сверхпроводнике каждый атом меди связан с четырьмя атомами кислорода, а в дырочном полупроводнике каждый атом меди связан с шестью атомами кислорода. Знак носителей определяется по знаку коэффициента Холла. Однако связь коэффициента Холла со знаком носителей довольно сложная в твердых телах со сложной структурой зон, которая существует в сверхпроводниках на основе меди. Другим методом определения знака носителей является измерение коэффициента Зеебека, который характеризует возникшую в образце разность потенциалов при создании в нем градиента температур. Измерения показали, что знак коэффициента Зеебека в новых сверхпроводниках меняется на обратный в сравнении со знаком в дырочных сверхпроводниках. Это также служит достаточно надежным подтверждением, что носители заряда в новых сверхпроводниках – электроны.

Глава 9 Астрофизика и космология

§ 9.1 Вторая революция в астрономии: всеволновой характер исследований

Если рассматривать в исторической перспективе весь процесс развития древнейшей из наук – астрономии, то можно говорить о двух отчетливо выделяющихся революционных периодах. Первая революция в астрономии датируется серединой XVI – началом XVII веков и связана с великими именами Коперника, Кеплера, Галилея. Этот бурный всплеск в развитии астрономии неразрывно соединен с эпохой Возрождения и великих географических открытий. Революция в астрономии привела к постепенному крушению схоластического геоцентрического мировоззрения и становлению гелиоцентрической системы мира, что имело огромное значение для человечества. Первые телескопические наблюдения Галилея наглядно доказали, что небесные тела состоят из той же материальной субстанции, что и земные. Изобретение телескопа – важнейший результат первой революции в астрономии, определивший ее лицо на последующие столетия, в течение которых астрономия обогатилась целым рядом выдающихся, фундаментальных открытий.

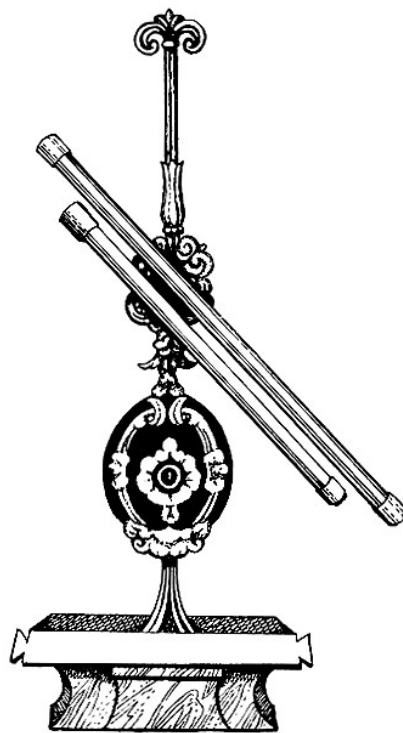


Рисунок 49 – Телескоп Галилея

Тем не менее, состояние астрономической науки в начале XX-го столетия нельзя было считать удовлетворительным. Коренным недостатком астрономии того времени был тот факт, что, несмотря на отдельные исключения, она была

статична. Астрономы фактически занимались изучением «застывшей», неразвивающейся Вселенной. Космические объекты разных типов нельзя было связать генетически. Важнейший вопрос об источниках энергии звезд – самых распространенных объектов Вселенной – вплоть до середины 30-х гг. оставался неясным.

Еще хуже было положение во внегалактической астрономии. В частности, как выяснилось в 50-х гг., сама система определения расстояний до галактик оказалась заниженной в 5-10 раз, что сильнее всего искажало наши представления о Вселенной. Кроме того, из-за несовершенства и ограниченности используемой тогда техники (напомним, что ни радио-, ни рентгеновской астрономии в начале 20-х веков еще не было) доступна наблюдениям была лишь малая окрестность нашей Галактики, в которой сколько-нибудь значительных эволюционных эффектов обнаружить было нельзя. Неслучайно поэтому в первой половине XX-го века широкое распространение получила концепция английского астрофизика Ф. Хойла о стационарной, неэволюционирующей Вселенной. Все это означало, что уровень наблюдательной астрономии того времени не позволял даже подойти к решению основной проблемы космологии.

Другим важнейшим недостатком астрономических исследований начала века была их спектральная ограниченность. Астрономы использовали в своих наблюдениях за Вселенной только видимый свет – эта методика оставалась неизменной еще с античных времен. Потребовался мощный рывок научно-технического прогресса середины XX-го столетия, чтобы положение коренным образом изменилось. Резюмируя сказанное, еще раз отметим, что к 30-50 годам XX-го века Вселенная представлялась довольно статичной, и, если можно так выразиться, «серой», т. е. не «многоцветной», так как вся она наблюдалась в одной, сравнительно узкой спектральной полосе.

Начавшийся приблизительно в середине XX-го столетия бурный период развития науки о вселенной называют «второй революцией в астрономии». Неразрывно связанный с выдающимися достижениями радиоэлектроники,

кибернетики и космонавтики, этот период ознаменовался большим количеством важнейших открытий в области астрономии и астрофизики. Наметился, по выражению выдающегося советского астрофизика И.С. Шкловского, процесс «диффузии» физиков в астрономию, так что эти две науки оказались неразрывно связанными. «Вторжение» физиков и физических методов исследований оказалось для астрономии весьма плодотворным. Еще более плодотворным оказалось внедрение в астрономию методов современной теоретической и экспериментальной физики (физика плазмы, физика твердого тела, общая теория относительности и т.д.) и современной вычислительной техники. Но самыми главными отличительными признаками второй революции в астрономии явилось то, что астрономия стала, во-первых, всеволновой, и, во-вторых, — насквозь эволюционной. Сейчас уже можно с уверенностью говорить, что нет такой длины волны, которая бы в большей или меньшей степени не использовалась в астрономии самым прямым образом, т. е. путем непосредственных наблюдений на этой волне.

Первый прорыв во Вселенную в отличном от оптического диапазоне частот совершил в 1932 г. американский инженер Карл Янский, построивший первый в мире радиотелескоп. После Второй мировой войны начался бурный прогресс радиоастрономии. Современные радиотелескопы по своим физическим характеристикам (таким как чувствительность по потоку, угловое разрешение, спектральное разрешение) значительно превосходят крупнейшие оптические телескопы. Сейчас радиоастрономия, наряду с оптической, является основой астрономии. Спецификой радиоастрономии является исключительная способность регистрировать и исследовать нестационарные процессы, сопровождающиеся бурным выделением энергии, такие как активность галактических ядер, вспышки сверхновых звезд, вспышечная



Рисунок 50 – Радиотелескоп РТ-22 в Пушкинской радиоастрономической обсерватории

активность красных карликовых звезд и другие. Едва ли не самым впечатляющим достижением радиоастрономии служат прямые наблюдения процесса звездообразования. Сюда относятся исследования космических мазеров – атрибутов процесса звездообразования, а также компактных ионизованных туманностей, окружающих вновь образовавшиеся массивные горячие звезды. Исследования по звездной космогонии ведутся в тесной кооперации с инфракрасной астрономией и почти совершенно не сопровождаются наблюдениями в оптическом диапазоне (из-за огромного поглощения света в сильно запыленных молекулярных облаках, из которых по причине гравитационной неустойчивости конденсируются протозвезды). Именно поэтому чисто оптическая астрономия не могла дать каких-либо

серьезных результатов в области фундаментальной проблемы звездообразования. Особенно поразительны достижения радиоастрономии при исследовании максимально удаленных метagalактических объектов. Квазары – галактические ядра с гипертрофированно высокой активностью – были открыты в 1963 г. благодаря радиоастрономии. Совершенно исключительное значение имело открытие в 1965 г. реликтового излучения, заполняющего всю Вселенную и имеющего «чернотельный» спектр на температуре 2,7 К (подробнее об этом будет сказано ниже). Наконец, следует упомянуть еще одно открытие фундаментальной важности – обнаружение в 1967 г. с помощью радиотелескопа пульсаров, оказавшихся давно предсказанными нейтронными звездами.

Детищем второй революции в астрономии является и рентгеновская астрономия, обусловленная развитием ракетной техники и космонавтики и связанных с ними электроники и автоматики. Успехи рентгеновской астрономии не менее впечатляющи, чем радиоастрономии. Достаточно упомянуть лишь открытие рентгеновских источников – нейтронных звезд в тесных двойных системах, излучающих в рентгеновском диапазоне в сотни тысяч раз мощнее, чем Солнце. Обнаружено также мощное рентгеновское излучение некоторых галактических ядер – важное свидетельство их высокой активности. Особое значение имеет открытие межгалактического газа внутри скоплений галактик, оказавшегося чрезвычайно горячей ($T \sim 10^8$ К) плазмой.

Успехи рентгеновской астрономии открыли новую возможность исследования вещества Вселенной в экстремальных условиях, существовавших на самых ранних этапах ее развития (подробнее об этом ниже). С этой целью был запущен целый ряд специальных рентгеновских спутников, позволяющих детально изучить данный диапазон, так как земная атмосфера для рентгеновского излучения практически непроницаема. Важные открытия были сделаны и в наиболее жестком спектральном диапазоне – гамма-диапазоне. Среди них открытие мощнейших гамма-импульсов, по всей вероятности связанных с пульсарами, а также общее гамма-излучение Галактики,

являющееся атрибутом заполняющих ее космических лучей, и обнаружение дискретных гамма-источников.

Таким образом, буквально весь диапазон электромагнитных волн сейчас перекрыт астрономическими телескопами и их аналогами, что и обосновывает вывод о всеволновом характере современной астрономии. Кроме того, исследования Вселенной уже не ограничиваются использованием тех или иных участков спектра электромагнитных волн. Астрофизики все чаще прибегают к исследованию других полей и частиц, отличных от фотонов. Этот процесс начался еще с изучения первичных космических лучей, а также корпускул солнечного ветра. Впоследствии все шире стали исследоваться космические нейтрино, что открыло перед учеными совершенно уникальные возможности. В самом деле, поскольку нейтрино чрезвычайно слабо взаимодействует с веществом, проходя огромные его толщи практически без изменений, то регистрация этих частиц зачастую является единственным способом получить информацию о структуре глубоких недр звезд и о протекающих там процессах.

Так, в результате эксперимента по приему нейтрино от Солнца, проведенного в 1968 г. в Брукхейвене (США) под руководством Р. Дэвиса, было установлено, что поток нейтрино примерно втрое меньше ожидаемого. На основании этих данных советско-итальянский физик Б. М. Понтекорво (1913-1993) выдвинул гипотезу о нейтринных осцилляциях, согласно которой вблизи Земли электронные нейтрино, идущие от Солнца, частично переходят в нерегистрируемые нейтрино ν_μ – «мюонное» и ν_τ – «таонное». В свою очередь, эта гипотеза привела к оценке нижнего предела массы нейтрино: $m_\nu > (30-50)$ эВ, что и было подтверждено экспериментально на рубеже XX-XXI веков.

§ 9.2 Эволюционный характер современной астрономии. Проблема звездной эволюции и источника энергии звезд

По современным представлениям, наиболее крупными структурными единицами вещества во Вселенной считаются скопления галактик, содержащие сотни галактик. В свою очередь, галактика содержит от миллиардов до сотен миллиардов звезд. Современная астрономия считает, что на расстояниях, превышающих сотни мегапарсек (это примерно 10^{24} м), распределение вещества во Вселенной уже практически однородно.

В астрономии сегодня считается твердо установленным следующий факт: в современную эпоху (охватывающую большую часть истории Вселенной) большая доля вещества сосредоточена в звездах. Звезды — основные, «главные» объекты Вселенной. Заметим, что на самом раннем этапе развития Вселенной это было совсем не так (см. ниже). Поэтому астрономия не может считать себя сколько-нибудь «законченной», «устоявшейся» наукой, если не поняты физические процессы в звездах, механизмы их эволюции.

Величайшим достижением второй революции в астрономии

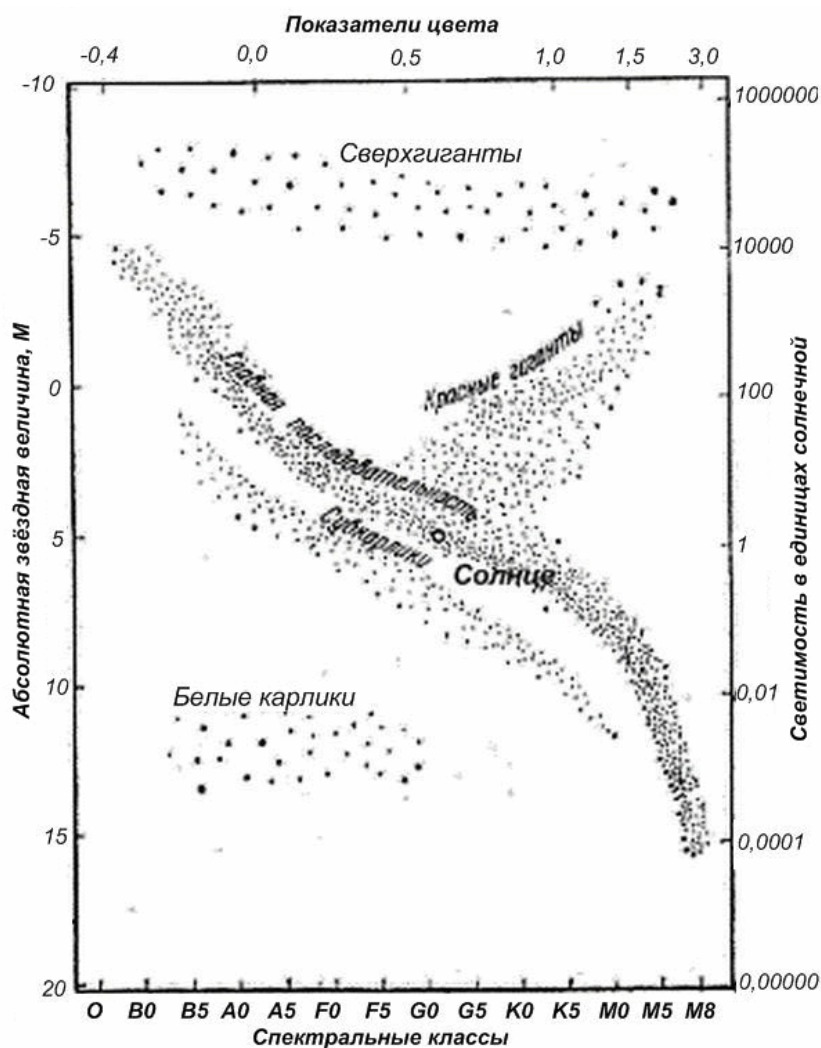


Рисунок 51 – Диаграмма Герцшпрунга-Рассела

явилось объяснение всех типов эволюции звезд, подтверждающиеся реальными наблюдениями. Понимание эволюции звезд включает в себя три основных этапа:

1. Этап образования звезды из газопылевой среды в холодных, сравнительно плотных облаках межзвездной среды в результате гравитационной неустойчивости. На этом этапе во второй половине XX века, главным образом благодаря достижениям радиоастрономии, были получены важнейшие результаты, о чем уже упоминалось в § 9.1. В итоге этих исследований классическая гипотеза об образовании звезд из межзвездной среды (а не из какого-либо другого более или менее фантастического агента) стала надежно установленной, т. е. опирающейся на наблюдения.

2. Наиболее длительным этапом эволюции звезды является ее равновесное, относительно спокойное «горение». Опираясь на достижения физики начала XX в., английский астрофизик Артур Стенли Эддингтон (1882-1944) построил в начале 20-х годов первую термодинамическую теорию равновесной излучающей звезды. Звезда в модели Эддингтона находилась в механическом равновесии благодаря тому, что гравитационное сжатие в ней уравнивалось газовым и световым давлениями. Построенная им теория, несмотря на ряд ошибочных начальных допущений, которые, впрочем, мало влияли на уравнения, позволила понять смысл установленной десятилетием ранее диаграммы Герцшпрунга-Рассела (ГР), или диаграммы «спектр-светимость». Эта диаграмма явилась первой фундаментальной физической закономерностью в мире звезд, она означает, что характер спектра звездной атмосферы определяется ее температурой. На диаграмме ГР практически все звезды располагаются в двух широких полосах. Одна соединяет ярчайшие голубые горячие звезды с наиболее слабыми (красными, холодными), - т.н. «главная последовательность» (такое название ей дал Эддингтон). Вторая – близкие по светимости, но различные по спектру, от голубых до красных («ветвь гигантов»).

Таким образом, теория Эддингтона смогла установить фундаментальную

зависимость между массой и светимостью звезд: светимость возрастает значительно быстрее массы. Это полностью подтвердилось для звезд главной последовательности диаграммы ГР (т.е. для подавляющего числа звезд в наблюдаемой Вселенной) и впервые объяснило наблюдаемый факт: то, что массы звезд различаются не более чем в сотни раз, тогда как светимости – в сотни миллионов раз.

В 1920 г. А. Эддингтон первым высказал идею о термоядерном синтезе водорода в гелий как источнике энергии звезд, однако почти два десятилетия эта идея оставалась не более чем гипотезой, не подкрепленной серьезными теоретическими исследованиями. Термоядерная природа источника энергии звезд была обоснована и получила прочный теоретический фундамент после того, как были открыты, почти одновременно несколькими учеными, два механизма перехода $H \rightarrow He$ в недрах звезд: протон-протонный и углеродно-азотный циклы, представляющие собой две цепи ядерных превращений, результатом которых в обоих случаях является превращение водорода в гелий. Первый был открыт в 1938 г. американским физиком-теоретиком Хансом Бете (1906-2005) (и одновременно независимо Ч. Критчфилдом), а второй – в 1938-39 гг. независимо Бете и немецким физиком К. фон Вайцзеккером. Вся дальнейшая теория эволюции звезд развивалась на основе этих представлений об источниках звездной энергии. По современным представлениям, в звездах имеют место оба цикла, как водородный, так и углеродный. Для звезд с массой $M \leq 2M_{\odot}$, где M_{\odot} – масса Солнца, наиболее длительный этап эволюции связан со спокойным «горением» ядерного водородного горючего по одному из двух вышеуказанных циклов. В течение этого этапа звезды почти не сдвигаются с главной последовательности на диаграмме ГР, занимая на ней место, соответствующее своей массе. Длительность данного этапа эволюции звезды тем больше, чем меньше ее масса. После того как звезда исчерпает существенную часть своего ядерного горючего, темп ее эволюции значительно ускоряется. Прежде всего, она начинает разбухать, превращаясь в красный гигант, перемещаясь на диаграмме ГР поперек главной последовательности. В

настоящее время эта эволюционная картина подтверждена многочисленными наблюдениями цветов и видимых величин звезд в звездных скоплениях, в каждом из которых возраст всех звезд практически одинаков, между тем как возрасты различных скоплений могут отличаться в сотни раз.

В ходе исследования этого этапа эволюции была выяснена природа еще с XIX века планетарных туманностей. Как оказалось, они возникают из отделившихся наружных

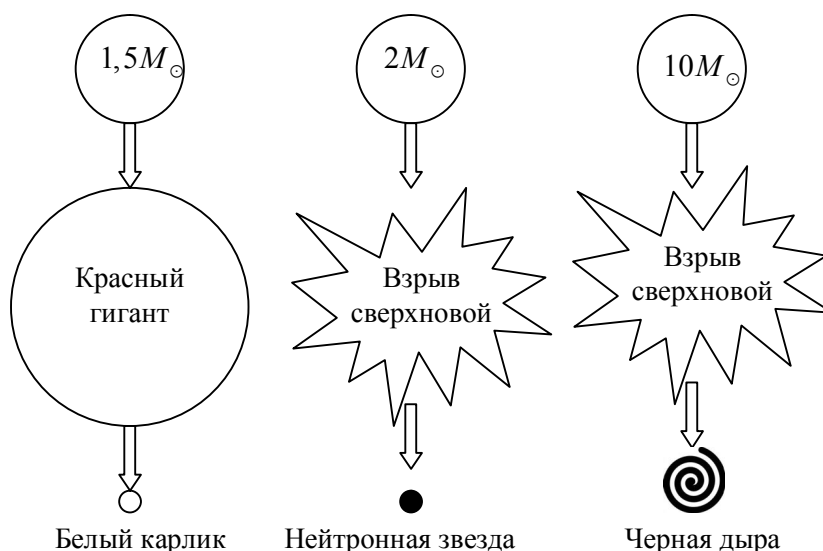


Рисунок 52 – Основные этапы эволюции звезд в зависимости от их массы

оболочек красных гигантов, в то время как сердцевины этих звезд одновременно довольно быстро (по космическим меркам) превращаются в белые карлики. Эти удивительные, очень плотные ($\rho \sim 10^6$ г/см³) маленькие звезды были известны астрономам довольно давно, но лишь в середине XX в. стало понятно, что они «вызревают» внутри «нормальных» звезд в процессе их эволюции. Тем самым была прослежена от рождения до смерти судьба 99% всех звезд.

Однако приблизительно 1% звезд со сравнительно большой массой «умирает» не путем превращения в лишенные источников ядерной энергии и потому практически переставшие эволюционировать постепенно остывающие белые карлики, а гораздо более драматически. Они взрываются, увеличивая на короткий срок (около недели) свою светимость в миллиарды раз. Это – важнейшее для астрономии явление вспышек сверхновых звезд. После такой вспышки остается, как правило, удивительный объект с радиусом порядка 10 км и средней плотностью порядка ядерной, т.е. 10^{17} кг/м³. Такие объекты с

совершенно необычными свойствами в радио- и рентгеновской астрономии называли пульсарами, они были открыты в 1967 г. группой английских астрономов под руководством Э. Хьюиша. Пульсары оказались не чем иным, как нейтронными звездами, теоретически предсказанными Л.Д. Ландау еще в 1932 г., сразу после открытия нейтрона.

Если же масса звезды превышает $10 M_{\odot}$, то после исчерпания ядерного горючего происходит неукротимое сжатие звезды под действием ее собственного тяготения, что ведет к неограниченному возрастанию плотности и неограниченному уменьшению размеров. Этот процесс называется гравитационным коллапсом. В результате гравитационного коллапса звезда превращается в черную дыру. Природа черной дыры может быть понята только на основе общей теории относительности. В настоящее время можно с уверенностью утверждать, что ряд наблюдаемых объектов во Вселенной являются черными дырами.

§ 9.3 Нестационарные модели Вселенной. Концепция расширяющейся Вселенной

Решение уравнений общей теории относительности (ОТО) позволяет в принципе построить математическую модель Вселенной. Эту космологическую проблему впервые

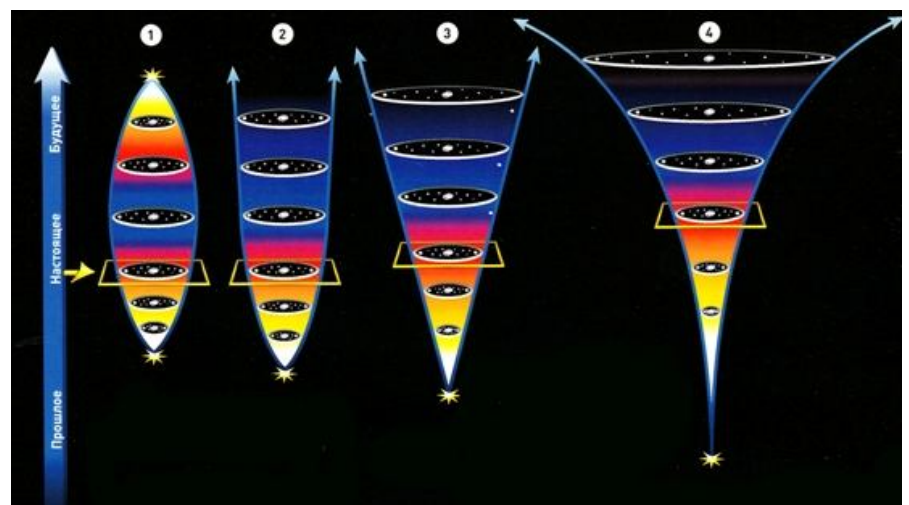


Рисунок 53 – Основные модели эволюции: 1 –пульсация (коллапс), 2 – замедляющееся расширение, 3 – линейное расширение, 4 – ускоренное расширение Вселенной

поставил сам Эйнштейн в 1917 г. Считая радиус кривизны пространства постоянным, т.е. исходя из представлений стационарности Вселенной в целом (что казалось наиболее разумным), он пришел к заключению, что Вселенная должна быть пространственно конечной, хотя и бесконечной во времени (вечной), – модель Вселенной в форме четырехмерного цилиндра. Однако, приняв а priori постулат о стационарности Вселенной, Эйнштейн обнаружил, что решение выведенных им же самим уравнений ОТО не давало стационарной модели мира, если не ввести в них искусственно дополнительный «космологический член» – постоянную величину Λ , имеющую (при $\Lambda > 0$) физический смысл сил отталкивания, или «отрицательного давления».

В 1922 г. молодой российский математик А.А. Фридман (1888-1925) первым отказался от исходного постулата о стационарности Вселенной, показав его теоретическую необоснованность. Он заново проанализировал уравнения ОТО и пришел к фундаментальному выводу о том, что сами по себе эти уравнения не дают однозначного ответа на вопрос о форме Вселенной, о ее конечности или бесконечности. Исходя из возможности изменения радиуса кривизны пространства со временем (т.е., по существу, из постулата о возможности эволюции Вселенной как целого) и приняв лишь условия однородности и изотропности Вселенной, Фридман нашел нестационарные решения уравнений ОТО в виде различных (определяемых значением Λ и знаком кривизны пространства) моделей нестационарной Вселенной. Некоторые из этих моделей рисовали Вселенную с монотонно растущим радиусом кривизны. Вселенная как целое оказывалась расширяющейся: в одном случае из точки, в другом – начиная с некоторого ненулевого объема. В другой модели радиус кривизны пространства возрастал от нуля до некоторой величины, а затем уменьшался до нуля (Вселенная сжималась в точку).

Плотность Вселенной в модели Фридмана также зависит от времени, изменяясь обратно пропорционально кубу радиуса кривизны. Модель стационарной Вселенной Эйнштейна, как показал Фридман, представляет собой лишь частный случай решения уравнений ОТО. Тем самым Фридман

опроверг мнение Эйнштейна о том, что ОТО обязательно приводит к конечности Вселенной при любой положительной средней плотности материи в ней. Результаты А.А. Фридмана, опубликованные в 1922 г. в немецком журнале *Zeitschrift für Physik*, сначала вызвали критику со стороны Эйнштейна как якобы ошибочные. Но после разъяснений Фридмана А. Эйнштейн в заметке 1923 г. в том же журнале признал правоту российского теоретика, назвав его результаты «правильными и проливающими новый свет». Более полную оценку вклада Фридмана Эйнштейн дал в 1945 г. в заметке, посвященной 20-летию со дня смерти выдающегося российского ученого: *«Его результат затем получил неожиданное подтверждение в открытом Хабблом расширении звездной системы ... Последующее представляет не что иное, как изложение идеи Фридмана. ... Не вызывает поэтому никаких сомнений, что это наиболее общая схема, дающая решение космологической проблемы.»*

Модель расширяющейся Вселенной Фридмана вскоре нашла подтверждение в непосредственных наблюдениях движений далеких галактик. Голландский астроном Виллем де Ситтер (1872-1934) впервые рассмотрел астрономические следствия ОТО и первым же отметил преобладание красных смещений в спектрах галактик. В конце 20-х годов американский астрофизик Эдвин Пауэл Хаббл (1889-1953) занялся анализом лучевых скоростей v_r галактик, располагая сначала данными лишь о 18 объектах, расположенных не далее скопления галактик в Деве (параметр красного смещения для них составляет не более десятых долей процента). Тем не менее, Хаббл уловил общую закономерность и в 1929 г. установил один из важнейших космологических законов:

$$v_r = Hr ,$$

вошедший в астрономию как «закон Хаббла», или «закон красного смещения».

Спустя несколько лет Хаббл подтвердил этот закон, опираясь на наблюдения более далеких галактик. Для коэффициента пропорциональности H он получил значение свыше 500 км/с/Мпс. Этот параметр – «постоянная

Хаббла» – является одним из фундаментальных в космологии. Первая его оценка оказалась сильно завышенной, и после уточнений в настоящее время принимают $H \approx 75$ км/с/Мпс.

А.А. Фридман в 1922 г. впервые поставил вопрос о «возрасте» Вселенной как о времени, прошедшем с начала ее расширения. Он произвел весьма приблизительный, оценочный расчет и получил, что время, прошедшее от «создания мира» (выражение А.А. Фридмана), имеет порядок десятков миллиардов лет. Вывод о «начале» Вселенной следовал и из наличия красного смещения при его объяснении эффектом Доплера. Это осознал, еще до опубликования закона Хаббла, на основе одних лишь наблюдательных данных, бельгийский астроном аббат Жорж Леметр (1884-1966). В конце 20-х годов он именно так истолковал наблюдаемый эффект в спектрах галактик и развил свою концепцию рождения нашей Вселенной.

Закон Хаббла давал в принципе ответ на вопрос о том, когда это произошло: величина $1/H$ характеризует время, в течение которого разбегаются галактики, и указывает момент начала разбегания, а быть может, и момент начала самого существования Вселенной. Если принять современное значение постоянной Хаббла $H \approx 75$ км/с/Мпс, то для возраста Вселенной получается примерно 15 млрд. лет, что вполне согласуется с огромным массивом накопленных астрономических данных.

§ 9.4 Теория Большого Взрыва и ее подтверждение

В 1927 г. Ж. Леметр, бывший незадолго до того студентом Эддингтона, независимо от Фридмана выдвинул свою идею возникновения Вселенной и ее дальнейшего расширения из точки. (Любопытно отметить, что Леметр, будучи священнослужителем, тем не менее, всячески избегал теологической трактовки своей теории). В 1933 г. он предложил новый вариант концепции расширения Вселенной – из плотного сгустка материи конечных, но очень малых размеров. Леметр первым попытался «нащупать» и возможные наблюдаемые следы

начального Взрыва, допуская, что таким отголоском могли быть космические лучи.

Формирование более конкретной, физически разработанной модели расширяющейся Вселенной связано в первую очередь с именем американского физика русского происхождения Джорджа (Георгия Антоновича) Гамова (1904-1968). Согласно теории, впервые предложенной Гамовым в 1946 г. и получившей наименование «теории Большого Взрыва», вся наблюдаемая ныне Вселенная представляет собой результат катастрофически быстрого разлета материи, находившейся до этого в сверхплотном состоянии. Это состояние, получившее название «сингулярности», недоступно для описания в рамках современной физики. Начавшееся расширение материи – в форме неразделимой вначале высокотемпературной смеси излучения и вещества (элементарных частиц) – наблюдается и в наши дни в виде эффекта «красного смещения». В 1948 г. Гамов и его сотрудники Р. Альфер и Р. Херман предсказали, что должно наблюдаться и остывшее первичное изотропное электромагнитное излучение, обладающее «чернотельным» спектром с температурой около 5 К. Теория Гамова, однако, большинством астрофизиков тех лет была встречена скептически. К тому же, регистрацию теплового радиоизлучения столь низкой температуры специалисты-радиофизики считали невозможным, поскольку подобный сигнал, по их мнению, был бы заглушен радиоизлучением звезд, галактик, межзвездной среды, т. е. космическим радиошумом. Из-за этого теория Большого Взрыва почти на два десятилетия была забыта.

Интерес к проблеме вновь начал расти в 60-е гг. в связи с анализом вопроса о формировании химических элементов во Вселенной на ранних стадиях ее расширения. Проблема холодного или горячего начального состояния Вселенной вызвала острые споры и дискуссии среди ученых. В результате американский физик-космолог и радиофизик Р. Дикке с сотрудниками начал подготовку к наблюдательной проверке концепции Большого Взрыва. Поэтому, когда в 1965 г. американские радиоинженеры

Арно Пензиас и Роберт Вильсон (не знавшие о теории Гамова!) при испытании рупорной антенны для наблюдения за американскими спутниками «Эхо» совершенно случайно открыли существование микроволнового (на волне 7,35 см) космического радиошума с температурой около 3 К, не зависящего от направления антенны, и это стало известно группе Дикке, те сразу поняли, что речь идет о первичном остаточном радиоизлучении. Известный советский астрофизик И.С. Шкловский (1916-1985) назвал это излучение «реликтовым», поскольку его кванты являются самыми «старыми» из всех наблюдаемых сегодня объектов нашей Вселенной. Так теория Большого Взрыва, или, как ее стали еще называть, теория «горячей Вселенной», получила наблюдательное подтверждение. А. Пензиас и Р. Вильсон были удостоены за свое открытие Нобелевской премии 1978 г.

Открытие реликтового излучения стало одним из величайших достижений астрономии XX века. Оно неопровержимо доказало, что Вселенная действительно эволюционирует. Кроме того, это открытие стало мощным стимулом для дальнейшего развития космологии.

§ 9.5 Концепция раздувающейся (инфляционной) Вселенной. Идея множественности инфляционных вселенных

В 80-е годы XX столетия в теории «горячей Вселенной» обнаружились серьезные трудности при попытке описать сам момент начала Вселенной и первоначальную стадию ее расширения, вплоть до значения $t \sim 10^{-33}$ с (так называемое «планковское время»). Следствия и выводы, к которым приводила «классическая» фридмановская космология для этого первоначального периода расширения, не соответствовали наблюдательным данным.

С целью преодоления этих трудностей была предложена, независимо друг от друга, А. Гутом в США и А.Д. Линде в СССР концепция раздувающейся, или инфляционной, Вселенной. Эта концепция базируется на модели, разработанной еще в 1917 г. В. де Ситтером, который использовал

ОТО для анализа размеров Вселенной. В модели де Ситтера рассматривалась почти пустая (т. е. не содержащая материи) Вселенная с учетом эйнштейновской космологической постоянной Λ , имеющей смысл гравитационного отталкивания (об этом упоминалось выше, в § 9.3). Де Ситтер в рамках своей модели пришел к выводу, что из-за гравитационного отталкивания размер Вселенной R будет нарастать со временем по экспоненциальному закону

$$R(t) = R_0 \cdot \exp \sqrt{\frac{\Lambda c t}{g}}.$$

Концепция инфляционной Вселенной предполагает, что на самой ранней стадии – от «начала» и до приблизительно момента $t \sim 10^{-33}$ с – наша Вселенная расширялась («раздувалась») по экспоненте, затем режим расширения приобрел «классический» степенной характер, предсказываемый теорией Большого Взрыва. Любопытно отметить, что одним из следствий инфляционной модели является то, что наша Вселенная однородна и изотропна. – свойство, которое ранее принималось только как гипотеза.

В 1986 г. А. Д. Линде поставил вопрос о том, является ли Вселенная, в которой мы живем, единственной, или же могут существовать много (даже бесконечно много) различных вселенных. Дело в том, что детальный анализ, проведенный на основе новейших достижений в физике элементарных частиц и космологии, привел к появлению антропного принципа, суть которого сводится к утверждению: **«Мы являемся свидетелями данных событий потому, что другие события протекают без свидетелей»** (формулировка принадлежит известному российскому космологу А. Л. Зельманову). Другими словами, существует взаимосвязь между свойствами Вселенной и возможностью появления в ней разумной жизни. Еще один вывод антропного принципа состоит в том, что наблюдатели («свидетели») могут появиться только при определенном наборе физических констант, при определенных физических законах. Если предположить, что существуют другие Вселенные с иными законами, то они существуют без сложных структур (без «свидетелей»), в них

никогда не появляется жизни. Таким образом, наша Вселенная – такая, какой мы ее видим, именно потому, что мы в ней есть.

Наконец еще одна важнейшая особенность мира, в котором мы живем: наше пространство трехмерно. (Вопрос о том, почему пространство трехмерно, прямо и недвусмысленно ставил еще в конце 19-го века немецкий философ и физик Э. Мах, чьи идеи оказали немалое влияние на Эйнштейна при создании теории относительности). Можно показать, что только в трехмерном пространстве закон для силы взаимодействия двух точечных масс или двух точечных электрических зарядов имеет вид

$$F \sim \frac{1}{r^2}.$$

С другой стороны, только при такой зависимости силы от расстояния возможно существование устойчивых круговых орбит. Это означает, что в гипотетическом пространстве с размерностью $N \neq 3$ невозможно существование связанных устойчивых систем тел, взаимодействующих электрическими и гравитационными силами, т.е. в нем не может быть ни атомов, ни планетных систем, ни галактик.

Образно говоря, если бы природе пришлось много раз пробовать «создавать» Вселенные с разными размерностями пространства, то только при $N=3$ возникали бы возможности для существования связанных систем и свободных тел, связанных и свободных состояний движения электрона в атомах, т. е. для возникновения очень сложных структур, жизни. А значит, именно в таких пространствах (и, вероятно, только в них!) могут существовать «свидетели». Неудивительно поэтому, что мы живем именно в трехмерном пространстве.

А.Д. Линде в своей работе 1986 г. показал, что за счет квантовых флуктуаций, которые должны существовать на самом раннем этапе, когда плотности близки к так называемой планковской $\rho_P \approx 10^{94}$ г/см³, могут рождаться многочисленные вселенные, не связанные между собой причинно-следственными связями. Эти вселенные стремительно удаляются друг от друга,

и каждая из них в дальнейшем эволюционирует независимо от соседних. При этом, как показал Линде, за счет квантовых флуктуаций число таких «мини-вселенных» множится с огромной скоростью. Согласно этой картине, Вселенная вечно воспроизводит сама себя в виде мини-вселенных с начальной плотностью, близкой к планковской ρ_P , и с самыми разными наборами физических законов и условий. Время от времени инфляция приводит к падению средней плотности Вселенной ниже некоторого критического значения и к возникновению горячей Вселенной Фридмана. Если в этой Вселенной физические параметры таковы, что могут возникнуть сложные структуры, как об этом говорилось выше, (а это, в свою очередь, вероятно, большая редкость), то в такой мини-вселенной возможно появление жизни. И если все это так, то в одной из таких редчайших мини-вселенных живем мы.

Из этой модели следует, что у Вселенной в целом нет начала во времени и нет конца. В самом деле, одни мини-вселенные обладают огромной плотностью материи, другие – малой; в некоторых из них одни физические законы, в других – другие. Кроме того, Вселенная в целом – вечно юная, сама себя воспроизводящая из «вакуумной пены» (квантовых флуктуаций вакуума) и поэтому нестареющая. Подавляющая часть ее объема всегда находится в состоянии сверхплотного «кипящего» вакуума. И из этого состояния изредка отпочковываются «пузыри», которые развиваются в системы, подобные «нашей» Вселенной. Таково, согласно модели Линде, воплощение идеи антропного принципа, требующего, чтобы природа «пыталась создавать» множество вселенных с самыми разными свойствами. В этой модели взрыв Вселенной происходит вечно, вечно продолжается фейерверк рождения новых миров. Образующиеся вновь мини-вселенные, раздуваясь, быстро теряют возможность обмена сигналами друг с другом, развиваясь, по существу, изолированно и независимо. Из-за флуктуирующих начальных условий история каждой из них не похожа на историю других.

В заключение следует лишь заметить, что только будущее развитие астрономии и астрофизики покажет, насколько эта, выглядящая весьма

фантастически, модель Вселенной соответствует действительности. Здесь уместно вспомнить слова Н. Бора, сказанные им по поводу одной из новых теорий элементарных частиц: ***«Это, конечно, сумасшедшая теория. Вопрос в том, достаточно ли она сумасшедшая, чтобы быть правильной».***

Список использованных источников

- 1 Кудрявцев, П.С. Курс истории физики: Учеб. пособие для студентов пед. ин-тов по физ. спец. - 2 изд., испр. и доп. / П.С. Кудрявцев. - М. : Просвещение, 1982. - 448 с, ил.
- 2 Спасский, Б.И. Физика в ее развитии / Б.И. Спасский. - М.: Просвещение. 1979.
- 3 Голин, Г.М. Классики физической науки / Г.М. Голин, СР. Филонович. - М.: Высшая школа, 1989.
- 4 Чолаков, В. Нобелевские премии - ученые и их открытия / В. Чолаков. - М.: Мир, 1987.
- 5 Яворский, Б.М. Фрагменты развития квантовой физики в первой четверти XX века / Б.М. Яворский. - М.: Прометей, 1996.
- 6 Вайскопф, В. Физика в двадцатом столетии / В.Вайскопф. -М.:Атомиздат, 1977.
- 7 Дирак, П.А.М. Воспоминания о необычайной эпохе / П.А.М. Дирак. - М.: Наука, 1990.
- 8 Еремеева, А.И. История астрономии / А.И. Еремеева, Ф.А. Цицин. - М.: Изд. МГУ, 1989.
- 9 Гернек, Ф. Пионеры атомного века. Великие исследователи от Максвелла до Гайзенберга / Ф.Гернек. - М.: Прогресс, 1974.
- 10 Пайс, А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна / А. Пайс. - М.: Наука, 1989.
- 11.Сегрс, Э. Энрико Ферми - физик / Э. Сегрс. - М.: Мир, 1973.
- 12.Ф. Кедров. Капица - жизнь и открытия / Ф. Кедров. - М.: М РД984.
- 13.Франкфурт, У.И. Физика наших дней / У.И. Франкфурт, А.М. Френк. -М.: Наука, 1971.
- 14.Филонович, СР. Лучи, волны, кванты / СР. Филонович. - М.: Наука, 1978.
- 15.С. Вайнберг, С. Открытие субатомных частиц / С. Вайнберг. - М.: Мир, 1986.

- 16.Фейнман, Р. Характер физических законов / Р. Фейнман. - М: Наука, 1987.
- 17.Новиков, И.Д. Как взорвалась Вселенная / И.Д. Новиков. - М.: Наука, 1988.
- 18.Бова, Б. Новая астрономия / Б. Бова. - М: Мир, 1976.
- 19.Шкловский, И.С. Проблемы современной астрофизики / И.С. Шкловский. - М.: Наука, 1988.
20. Тарасов, Л.В. Лазеры: действительность и надежды / Л.В. Тарасов. - М.: Наука, 1985.