

Национальный исследовательский университет
Высшая Школа Экономики

курс-майнор 2017-2018 уч.года
«Квантовая физика 'для чайников'»

В.Н.Глазков

Лекция 1

Причины возникновения квантовой теории.
Фотоэффект — его законы и применения.

Оглавление

Оргвопросы или «Какого цвета учебник».....	4
Введение.....	5
О «здоровом смысле».....	6
Место квантовой физики в современной научной картине мира.....	8
Возникновение квантовой теории. Проблемы классической физики конца 19 века.....	11
Проблема 1. Строение атома.....	12
Проблема 2. Линейчатые спектры испускания и поглощения.....	13
Проблема 3. Фотоэффект.....	14
Проблема 4. Излучение чёрного тела.....	16
Проблема 5. Теплоёмкость твёрдых тел и газов при низкой температуре.	17
Фотон и другие квазичастицы.....	21
Фотоэффект.....	23
История обнаружения эффекта и законы внешнего фотоэффекта.	23
Внутренний и многоквантовый фотоэффект.	24
Практические применения фотоэффекта.....	27
Вакуумные фотоэлектронные умножители.....	27
Фотодиоды, фоторезисторы.....	28
Солнечные батареи.....	28
Задачи на световые кванты и внешний фотоэффект.....	30

Список литературы

- 1: Сайт нобелевского комитета, Список нобелевских лауреатов по физике, , http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/
- 2: Сайт нобелевского комитета, Список нобелевских лауреатов по химии, , http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/
- 3: Amateurspectroscopy.com, Оптические спектры ряда распространённых химических элементов, , <http://www.amateurspectroscopy.com/color-spectra-of-chemical-elements.htm>
- 4: Н.С.Хлебников, Работы А.Г.Столетова по фотоэффекту, 1939
- 5: D.F.Weber , Die specifischen Wärmen der Elemente Kohlenstoff, Bor und Silicium, 1875
- 6: W.DeSorbo, Specific Heat of Diamond at Low Temperatures, 1953
- 7: R.E.Cornish and E.D.Eastman, The specific heat of hydrogen gas at low temperatures..., 1928
- 8: G. G. Sherratt and Ezer Griffiths, , 1934
- 9: G. G. Sherratt and Ezer Griffiths, , 1936
- 10: Википедия, Работа выхода, , http://en.wikipedia.org/wiki/Work_function
- 11: М.С.Teich and G.J.Wolga, Two-Quantum Volume Photoelectric Effect in Sodium, 1968
- 12: Википедия, Список крупных солнечных электростанций, 2015, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_photovoltaic_power_stations

Оргвопросы или «Какого цвета учебник»

Экзамен в вузе. Входит преподаватель:

- Вопрос на 5 — как меня зовут? Молчание.
- Вопрос на 4 — что сдаем? Молчание.
- Вопрос на 3 — какого цвета учебник?

Голос с задней парты:

- Во валит гад.

(с) старинный студенческий анекдот

Курс «Квантовая механика 'для чайников'» подготовлен в качестве первого курса курса-майно́р ВШЭ «Мир глазами физиков».

Составители курса:

- Глазков Василий Николаевич, к.ф.-м.н., с.н.с. Института физических проблем им. П.Л.Капицы РАН, с.н.с. НИУ ВШЭ, доц. МФТИ
- Лемзяков Сергей Анатольевич, асп. МФТИ
- Голоколенов Илья Алексеевич, асп. ВШЭ

Контакты лектора для общих вопросов по курсу vglazkov@hse.ru. Контакты преподавателей семинаров для рабочих вопросов будут доведены на занятиях.

Во многом курс будет опираться на доступные он-лайн курсы В.Н.Глазкова по квантовой и атомной физике:

- [Введение в квантовую физику](http://www.kapitza.ras.ru/people/glazkov/teaching/quantum.pdf),
<http://www.kapitza.ras.ru/people/glazkov/teaching/quantum.pdf>
- [Атомная и ядерная физика](http://www.kapitza.ras.ru/people/glazkov/teaching/atomic.pdf),
<http://www.kapitza.ras.ru/people/glazkov/teaching/atomic.pdf>

Также в качестве литературы по курсу можно рекомендовать ставшую уже классической и прошедшую множество переизданий книгу Л.И.Пономарёва «Под знаком кванта».

Все составители курса работают в области экспериментальной физики низких температур — как мы увидим по ходу курса, как раз той области физики, где проявляются многочисленные и иногда необычные квантовые явления. В ходе курса мы постараемся познакомиться с этими явлениями, не прибегая, насколько это возможно, к сложной математике, и будем стремиться показать, что квантовые явления действительно окружают нас и встречаются гораздо чаще, чем это может показаться. Подразумевается наличие у слушателей (курс ориентирован на студентов 2 курса НИУ ВШЭ нефизического профиля образования) знаний (или хотя бы воспоминаний) о школьном курсе физики и математики.

Курс оценивается по результатам экзамена, промежуточного контроля и текущего контроля. Алгоритм формирования итоговой оценки:

Итоговая оценка (**ИО**) складывается из накопительной десятибальной оценки за работу в семестре (**НАК**) и десятибальной оценки за итоговый экзамен (**ЭКЗ**):
ИО=0.6НАК+0.4ЭКЗ. Экзамен проводится в форме письменного тестирования.

Накопительная оценка складывается из десятибальной оценки за тестирование в конце первого модуля (**ТЕСТ**) и десятибальной оценки за работу на семинарах (**СЕМ**): **НАК=0.6 ТЕСТ+0.4СЕМ**. Оценка за работу на семинарах ставится семинаристом по результатам проявленной активности, выступлений у доски.

Итоговая формула: **ИО=(0.36ТЕСТ+0.24СЕМ)+0.4ЭКЗ** , по общим правилам ВШЭ накопительная часть оценки в случае переэкзаменовки не подлежит пересмотру.

Введение.

Мы все учились понемногу

Чему-нибудь и как-нибудь

А.С.Пушкин, «Евгений Онегин», I, V

С основами квантовой теории мы все знакомимся в школе. Квантовая теория в школьной программе физики занимает не самое заметное место. Во многом это связано с чисто технической невозможностью рассматривать многочисленные (необычные и интересные) физические явления, относящиеся к квантовой физике, на достаточно строгом уровне (что часто требует владения достаточно сложным математическим аппаратом). В чём-то это связано и с тем, что квантовая физика это одна из завершающих тем школьного курса физики и может сказываться нехватка учебных часов для изучения этой темы. В результате в школьной программе из вопросов квантовой физики остаются некоторые вопросы строения атома (боровская модель атома водорода), фотоэффект и давление света (которое, строго говоря, квантовым эффектом не является).

В результате такого поверхностного изучения может возникать существенный пробел в формировании научной картины мира — обрывочные знания порой страшнее незнания. И почти каждый может найти в памяти какие-то «заклинания»: «корпускулярно-волновой дуализм», «волновая природа частиц», «неопределённость». При этом уже трудно понять или вспомнить, откуда возникли эти «заклинания», что они означают. И начинается порой неуёмный полет фантазии. Из-за этого квантовая физика занимает почётное второе место (после теории относительности) в попытках ниспровержения «неправильных», «непонятных», «противоречащих здравому смыслу» теорий. Поэтому одной из задач нашего курса будет вспомнить и ПОНЯТЬ, что квантовая физика это не набор мистических «заклинаний», а логичная, связанная область научного знания, достоверно подтверждённая многочисленными экспериментами и наблюдениями. Также эти «заклинания» часто встречаются в откровенно лженаучных (и порой лежащих на грани прямого мошенничества) рекламных объявлениях (типа «квантовой медицины» и других), спекулируя на доверии человека к непонятным *кажущаяся-научным* словам — так что мы в ходе этого курса надеемся и сделать некоторую интеллектуальную вакцинацию слушателей от подобного рода ловушек.

Другое, может быть даже более важное, значение изучения квантовой физики для нас будет заключаться в возможности проследить, как развивается научное познание мира. В этом смысле в простой, почти школьной, физике можно выделить две теории: квантовую теорию и теорию электричества¹. На примере изучения теории электричества мы можем увидеть, как двигалось понимание электрических явлений от простых опытов и эмпирических законов к системе уравнений Максвелла — четырёх уравнений, в которых выражаются все наши знания о электрических и магнитных явлениях. Приведём здесь эти уравнения без объяснения, просто как пример того как огромный объём знаний от закона Кулона до распространения радиоволн может быть в результате научного прогресса записан всего в четыре строчки:

¹ Входит в программу майно́ра «Мир глазами физиков» на втором году майно́ра.

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

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} .$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

На примере квантовой теории можно увидеть другую грань научного познания мира, увидеть, как возникает новая область научного знания — от проблем в существующей картине мира к их пониманию и объяснению, и как эта новая область оказывается связана с уже существующими областями науки, не противореча им, но дополняя в области их применения.

О «здравом смысле».

Одна из психологических проблем при знакомстве с неклассическими разделами физики: в частности, квантовой физикой или теорией относительности, заключается в попытке примирить новые знания со своим повседневным опытом и с житейским «здравым смыслом». Так, узнав о волновых свойствах объектов микромира, человек подсознательно пытается применить это новое знание к привычным объектам. В результате, возникает конфликт: ведь наш опыт говорит, что мяч, книга, кошка — это вполне определённые объекты, находящиеся в определённом месте и уж точно никакими волнами в стороны не разбегающиеся.

Во избежание возникновения этой проблемы в дальнейшем, необходимо чётко понять, что наш «здравый смысл» формируется в очень ограниченном пространстве параметров — это не слишком маленькие и не слишком большие предметы, двигающиеся не слишком быстро, взаимодействующие не очень сильно и не очень слабо и так далее. Частично это можно отобразить следующей схемой (рисунок 1).

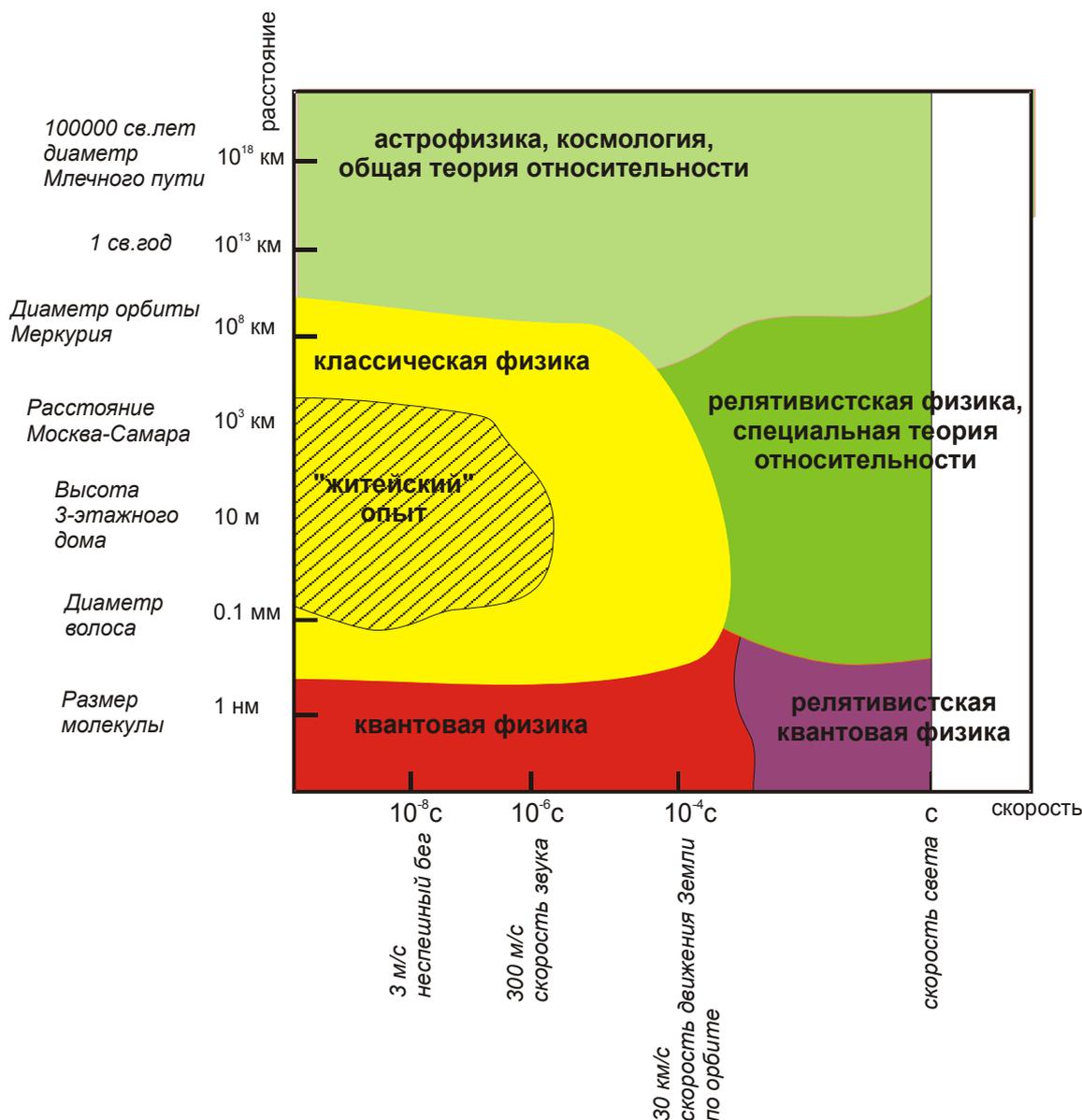


Рисунок 1: Область параметров на плоскости (скорость; расстояние) в которой формируется наш "здоровый смысл".

Схема эта весьма условна, чётких границ между различными областями физики нет — они переходят друг в друга непрерывно. Схема эта несомненно неполна, можно её уточнять, например, вспомнив про физику элементарных частиц. Но есть один важный вывод, ради которого мы и нарисовали эту схему: область параметров, в которой формируется наш «жизненный опыт» и «здоровый смысл» очень небольшая. Поэтому нет ничего удивительного, что в условиях далёких от привычных нам (в частности, в микромире) действуют другие законы. И применять понятия «здорового смысла» всегда надо с осторожностью, отдавая себе отчёт в том, что этот «здоровый смысл» не универсален.

Многое в природе оказывается невозможно вообразить опираясь на наш повседневный опыт, однако при этом можно понять и объяснить. И в этом, возможно заключается одно из величайших достижений научного познания мира, одно из величайших достижений человеческого разума: мы можем понять то, чего не можем представить.

Место квантовой физики в современной научной картине мира.

Забегая немного вперёд, до начала разговора о причинах, вызвавших переход к квантовой физике, можно отметить, что квантовая физика является важной составляющей научной картины мира, она тесно связана с другими областями физики: физика твёрдого тела это во многом квантовая физика, явления сверхтекучести и сверхпроводимости — это квантовые явления, вопросы строения материи и взаимодействия излучения с веществом не могут быть поняты во всей полноте без методов квантовой физики. В качестве в значительной степени объективной оценки роли квантовой физики можно рассмотреть список Нобелевских премий по физике [1] и химии [2] — и мы увидим, что за открытия, связанные с квантовой физикой присуждена заметная часть премий:

- 1904 — Уильям Рамзай (химия). В том числе, за получение и идентификацию гелия. Газ был идентифицирован по линейчатым спектрам поглощения, совпадающим с характерными линиями поглощения в излучении Солнца, обнаруженным ранее (Локьер, Жансен, ок. 1870).
- 1906 — Джозеф Джон Томсон. В признание выдающегося вклада его теоретических и экспериментальных исследований электропроводности газов. Одно из этих исследований привело к открытию электрона и, таким образом, открыло вопрос об установлении внутренней структуры атома.
- 1911 – Вильгельм Вин. За открытие законов, описывающих тепловое излучение. Задача об излучении абсолютно твёрдого тела рассматривалась многими выдающимися учёными того времени (Кирхгоф, Рэлей, Больцман). Как мы увидим позднее, полностью эта задача может быть решена только методами квантовой физики (что и сделал М.Планк).
- 1918 — Макс Карл Эрнст Людвиг Планк. За открытие кванта энергии (точная, трудно переводимая, формулировка: "in recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta").
- 1919 — Иохан Штарк. В том числе, за открытие расщепления спектральных линий в электрическом поле. Этот эффект, эффект Штарка, был объяснен квантовой механикой.
- 1920 – Вальтер Герман Нернст (по химии). В признание его работ в области термодинамики. В частности, за открытие теоремы Нернста или третьего начала термодинамики, описывающего поведение материи вблизи абсолютного нуля и объяснимого только в рамках квантовой теории.
- 1921 — Альберт Эйнштейн. За достижения в области теоретической физики и, в особенности, за открытие закона фотоэффекта.
- 1922 — Нильс Хенрик Давид Бор. За достижения в изучении структуры атомов и испускаемого ими излучения.
- 1923 — Роберт Эндрю Милликен. За определение элементарного заряда и работы в области фотоэффекта. Интересно, что целью опытов Милликена по фотоэффекту было опровержение гипотез Эйнштейна и Планка и «восстановление в правах»

классической максвелловской электродинамики. Однако его опыты были выполнены настолько точно, что без всяких сомнений подтвердили эти гипотезы. В речи при представлении лауреата председатель Нобелевского комитета профессор А.Гуллstrand сказал: «Если бы опыты Милликена дали другой результат, закон фотоэффекта Эйнштейна оказался бы пустым, а теория Бора не получила бы такой опоры. После появления результатов Милликена оба они были удостоены Нобелевской премии.»

- 1924 — Карл Манне Георг Зигбан. За открытия и исследования в области рентгеновской спектроскопии. Его исследования рентгеновских спектров позволили связать рентгеновское излучение с переходами электронов между внутренними оболочками атомов и таким образом внесли вклад в обоснование теории Бора.
- 1925 — Джеймс Франк и Густав Людвиг Герц (в равных долях). За открытие законов, определяющих столкновения электронов и атомов. С появлением теории Бора задача о столкновении атома и частицы (электрона, например) перестала быть задачей классической механики, так как атом может поглощать только вполне определённые порции энергии, соответствующие переходу электрона между некоторыми уровнями. В своей речи при представлении лауреата член Нобелевского комитета профессор С.В.Озеен сказал: «Посредством разработанного лауреатами метода, при их личном участии получен большой материал, касающийся столкновений между электронами и различными объектами. Хотя полученные результаты важны и сами по себе, более важным в настоящий момент является заключение о том, что гипотеза Бора о различных состояниях атома и связь между этими состояниями и излучением по результатам этих измерений полностью соответствует реальности. »
- 1927 — Артур Холли Комптон (1/2 премии). За открытие эффекта Комптона. Эффект Комптона — это рассеяние фотона на электро́не, при котором проявляются корпускулярные свойства излучения. Мы рассмотрим его позднее.
- 1929 — Луи де Бройль (герцог Луи-Виктор Пьер Раймонд де Бройль). За открытие волновой природы электрона.
- 1930 — Шандрасехара Венката Раман. За работы по изучению рассеяния света и открытие эффекта Рамана. Эффект Рамана или комбинационное рассеяние света был одновременно и независимо открыт советскими физиками Л.И.Мандельштамом и Г.С.Ландсбергом. Он проявляется в том, что при рассеянии света в среде возможны процессы, когда поглощённый и переизлучённый фотоны имеют несколько разную частоту. Разность этих частот соответствует энергии возбуждения центра рассеяния (например молекул среды).
- 1932 — Вернер Карл Гейзенберг. За создание квантовой механики, применение которой привело, в числе прочего, к открытию аллотропных форм водорода.
- 1933 — Эрвин Шредингер и Поль Адриен Морис Дирак (в равных долях). За открытие новых продуктивных представлений атомной теории. Основные уравнения нерелятивистской и релятивистской квантовой физики называются уравнениями Шредингера и Дирака, соответственно.
- 1937 — Клинтон Йозеф Дависсон и Джордж Пагет Томсон (в равных долях). За экспериментальное открытие дифракции электронов на кристалле.
- 1943 — Отто Штерн. За вклад в развитие метода молекулярных лучей и открытие

магнитного момента протона. Эта работа связана с понятием спина элементарной частицы — специальной квантовой характеристики собственного момента вращения частицы. Полученный результат, известный как опыт Штерна — Герлаха, заключается в том, что при прохождении узкого пучка частиц (ионов) через область с неоднородным магнитным полем пучок не уширяется, как предсказывает классическая теория, а разбивается на несколько (в зависимости от вида частиц) узких пучков. Этот эффект непосредственно связан с не имеющими классического аналога правилами квантования момента вращения, о которых мы вкратце поговорим, когда будем обсуждать строение атома.

- 1945 — Вольфганг Паули. За открытие принципа исключения, также называемого принципом Паули.
- 1954 — Макс Борн (1/2 премии). За фундаментальный вклад в развитие квантовой механики и в особенности за статистическую интерпретацию волновой функции.
- 1955 — Виллис Эжен Лэмб, за открытие тонкой структуры спектра атома водорода, и Поликarp Куш, за точное определение магнитного момента электрона (в равных долях). Оба результата связаны с проявлением релятивистских эффектов и были позднее объяснены в рамках релятивистской квантовой теории (квантовой электродинамики). Мы вкратце затронем этот вопрос, так как с магнитным моментом электрона связан один из самых точных случаев совпадения теории и эксперимента.

К этому времени квантовая теория уже полностью принята и не вызывает сомнений, её методы применяются во многих областях физики. Так, вся физика конденсированного состояния опирается на квантовую теорию: это и теория металлов, и сверхпроводимость, и физика полупроводников. В физике элементарных частиц, естественно, царит квантовая физика. Поэтому далее перечислим только наиболее яркие открытия, или открытия связанные с советскими или российскими учёными:

- 1962 — Лев Давидович Ландау, за разработку передовых теорий в области физики конденсированных сред и, в особенности, жидкого гелия. Сверхтекучее состояние гелия является одним из макроскопических квантовых эффектов.
- 1964 — Чарльз Хард Таунс (1/2 премии), Николай Геннадьевич Басов (1/4 премии) и Александр Михайлович Прохоров (1/4 премии). За фундаментальные работы в области квантовой электроники, приведшие к созданию генераторов и усилителей работающих на принципе мазера-лазера.
- 1965 — Шин-Итиро Томонага, Джулиан Швингер, Ричард Фейнман. За их фундаментальный вклад в квантовую электродинамику. В частности, ими были объяснены аномалии в собственном магнитном моменте электрона, за обнаружение которых была присуждена Нобелевская премия по физике 1955 года.
- 1972 — Джон Бардин, Леон Нейл Купер, Джон Роберт Шрифер (в равных долях). За разработку теории сверхпроводимости, обычно называемой теорией БКШ.
- 1973 — Лео Есаки (1/4 премии) и Ивар Гявер (1/4 премии), за экспериментальное обнаружение эффекта туннелирования в полупроводниках и сверхпроводниках, и Брайан Давид Джозефсон (1/2 премии), за теоретическое предсказание свойств тока сверхпроводимости через туннельный барьер и в особенности за совокупность явлений, называемую эффектом Джозефсона. Туннельный эффект — это особенная форма «движения», не имеющая аналогов в классической физике. В результате

туннелирования, например, электрон может перескочить («протуннелировать») из проводника в проводник через слой диэлектрика (туннельный барьер). На этом эффекте, например, работают туннельные микроскопы, позволяющие изучать поверхность с атомным разрешением. Также на эффекте туннелирования работают туннельные диоды, в частности используемые в некоторых радиоприборах.

- 1978 — Пётр Леонидович Капица (1/2 премии), за изобретения и открытия в области физики низких температур, Арно Аллан Пенциас и Роберт Вудро Вилсон (по 1/4 премии), за открытие реликтового космического излучения. Открытие Капицы — это в первую очередь открытие сверхтекучести гелия. Сверхтекучесть гелия это уникальное, квантовое, макроскопическое явление, теория которого была создана Л.Д.Ландау. Реликтовое излучение тоже несколько связано с квантовой физикой, так как спектр этого излучения является спектром абсолютно чёрного тела с температурой около 2К.²
- 1985 — Клаус фон Клитцинг. За открытие квантового эффекта Холла. На основе этого эффекта созданы современные стандарты сопротивления.
- 1994 — Бертрам Н. Брокхауз и Клиффорд Г. Шуль (в равных долях). За пионерский вклад в развитие техники рассеяния нейтронов при исследовании конденсированных сред. Нейтроны проявляют волновые свойства, как и электроны. Поэтому при облучении кристалла нейтронами возникает дифракция. В силу малой длины волны и некоторых особенностей взаимодействия нейтронов с веществом, это представляет в руки исследователя мощный инструмент для изучения свойств вещества.
- 1996 — Дэвид М. Ли, Дуглас Д. Ошероф, Роберт С. Ричардсон (в равных долях). За открытие сверхтекучести гелия-3. В изотопе гелия-3 на один нейтрон меньше, чем в обычном гелии-4. Поэтому свойства этих двух изотопов сильно отличаются: гелий-4 оказывается бозоном (подчиняется статистике Бозе), а гелий-3 оказывается фермионом (подчиняется статистике Ферми). Поэтому сверхтекучее состояние гелия-3 существенно отличается от аналогичного состояния гелия-4.
- 2003 — Алексей А. Абрикосов, Виталий Лазаревич Гинзбург, Энтони Дж. Леггет (в равных долях). За пионерский вклад в теорию сверхтекучести и сверхпроводимости.

Итак, заметная часть важнейших открытий в области физики связана с квантовой физикой. Квантовая теория, как мы видим по этому перечислению достижений, объяснила многие явления природы. Она сейчас является признанной и многократно подтверждённой теорией. Как же возникла эта теория?

Возникновение квантовой теории. Проблемы классической физики конца 19 века.

Только что мы рассмотрели путь становления квантовой теории «с высоты птичьего полёта»: по Нобелевским премиям, которыми отмечено её развитие. Рассмотрим подробнее, как возникла квантовая физика, какие причины привели к её возникновению. Это рассмотрение важно с познавательной, исторической и философской точки зрения, так как показывает на

² А небольшие отклонения от этого закона (анизотропия реликтового излучения и эффект Зельдовича-Сюняева) оказались мощным инструментом наблюдательной астрофизики.

наглядном примере, как развиваются *научные* теории. Понимание этого вопроса позволит вам в последующем легко отсеивать часто возникающие *лженаучные* теории, о которых, к сожалению, слишком часто говорят и пишут в «популярных» средствах массовой «информации».

Итак, первым необходимым шагом к возникновению новой теории, в чём-то ограничивающей область применения существующих теорий является появление объективно установленных фактов, которые нельзя объяснить существующими теориями. Что было известно в физике в конце 19 века? Довольно много: уже сложилась классическая механика (Ньютон, ок.1690; Лагранж, 1788; Гамильтон, 1833), термодинамика (Джоуль, Клаузиус, Больцман, Кельвин активно работали в середине-конце 19 века), электродинамика (уравнения Максвелла опубликованы в 1873 году). Известна история о том, как примерно в 1875 году молодой Макс Планк спросил своего профессора в университете Мюнхена Филиппа фон Жолли о новых областях в физике и получил ответ: «В этой области знаний все уже открыто, осталось только уточнить кое-какие детали». Как оказалось, некоторые из этих «деталей» являлись указателями на пути к революционным изменениям в физике.

Среди них выделим и рассмотрим подробнее следующие:

1. Строение атома. Невозможность существования стабильного атома с точки зрения электродинамики.
2. Линейчатые спектры испускания и поглощения. Классическая теория не может объяснить почему испускание и поглощение света различными атомами происходит на дискретных частотах, связанных к тому же простыми алгебраическими соотношениями (например, для серии Бальмера в спектре атома водорода
$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)).$$
3. Фотоэффект. Невозможность объяснить красную границу фотоэффекта и зависимость энергии фотоэлектронов только от частоты.
4. Излучение чёрного тела. Отсутствие полного объяснения зависимости интенсивности излучения нагретого тела от частоты и температуры.
5. Теплоёмкость твёрдых тел и газов при низкой температуре. При понижении температуры теплоёмкость тел меняется так, что нарушается теорема о равномерном распределении.

Проблема 1. Строение атома.

В 1897 году Дж.Дж.Томсон опубликовал свою работу об обнаружении частиц более мелких, чем атомы. Фактически, этим было установлено существование электрона, как более мелкой составной части материи.³ После этого сразу возник вопрос об устройстве атома, который, как тогда уже было известно, в целом электронейтрален.

В попытке разрешить эту задачу Томсон предложил (1903) свою модель атома, в которой положительный заряд распределён непрерывно по объёму «атома», а электроны оказываются погружены в эту положительно заряженную каплю. Эта модель известна так же как «модель пудинга» — электроны напоминают изюминки в пудинге. Эта модель кажется странной сейчас, когда мы уже привыкли к планетарной модели Резерфорда-Бора. Однако надо

³ Этот результат был в числе тех, за которые Дж.Дж.Томсону была присуждена Нобелевская премия по физике 1906 года.

заметить, что есть одно простое соображение из теории электричества, которое, возможно, подтолкнуло Томсона к его модели. Дело в том, что в электростатике строго доказывается, что система из точечных зарядов не может пребывать в статическом равновесии. То есть, вероятно, Томсону было прекрасно известно, что устроить равновесие между малым (точечным) электроном и малым (точечным) ядром невозможно. Модель, в которой электрон погружен в «пудинг» положительного заряда такого недостатка лишена. Например для простейшего случая одного электрона и сферической «капли» положительного заряда для электрона есть положение устойчивого равновесия в центре «капли».

Дальнейшие исследования Резерфорда (1911, *после* присуждения ему нобелевской премии по химии в 1908 году) показали, что положительный заряд локализован. Это привело к планетарной модели атома — для обхода упомянутой выше статической нестабильности системы точечных зарядов электроны предположены движущимися по орбите вокруг массивного положительно заряженного ядра.

При этом однако возникает проблема связанная с электродинамикой: движение по окружности ускоренное, а ускоренно движущаяся частица излучает. Таким образом, движущийся по круговой орбите электрон должен все время излучать электромагнитные волны и, следовательно, терять энергию и, в конечном итоге, падать на ядро. Время жизни такого атома оказывается ничтожно малым.

Итак: эксперимент указывает на планетарную модель атома, однако такой атом не может существовать с точки зрения классической теории.

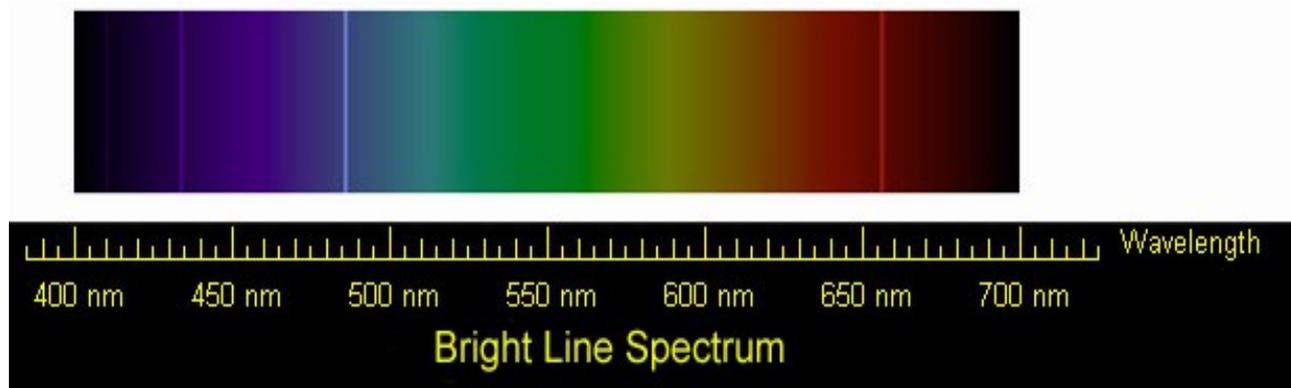
Проблема 2. Линейчатые спектры испускания и поглощения.

Рисунок 2 Серия Бальмера в спектре водорода. С сайта http://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/xray_generation_atom.html

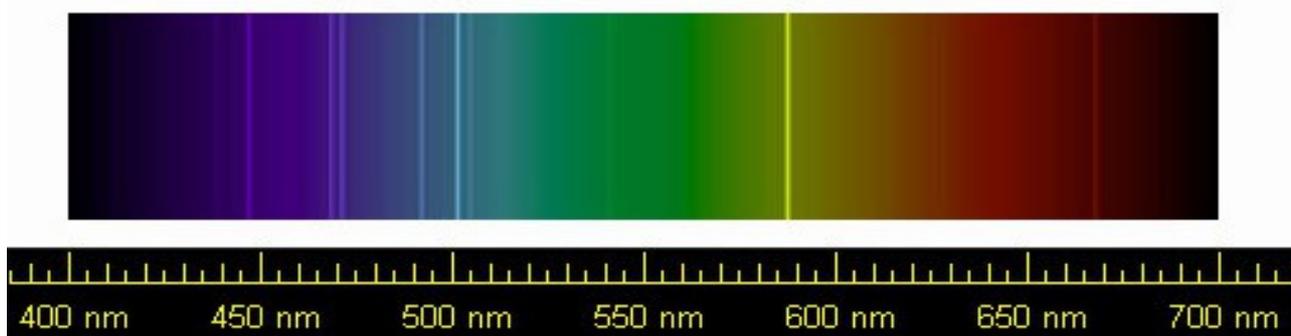


Рисунок 3 Спектральные линии гелия. С сайта http://imagine.gsfc.nasa.gov/educators/lessons/xray_spectra/worksheet-specgraph2-sol.html

В 1704 году в труде Ньютона «Оптика» было описано разложение белого света на составляющие. В начале 19 века Фраунгофер (1814) обнаружил что в спектре солнечного света существует свыше 500 тёмных линий (называемые теперь линиями Фраунгофера). В 1854 году Кирхгоф и Бунзен начали изучать спектры пламени, окрашенного парами металлических солей, и пришли к выводу (1859), что яркие линии в спектре пламени совпадают с тёмными линиями, проявляющимися при пропускании через пламя «внешнего» света, а также к выводу о том, что эти линии уникальны для различных элементов (сравните серии спектральных линий для водорода и гелия на рисунках 2 и 3, многочисленные примеры спектров испускания и поглощения различных элементов могут быть найдены в литературе или на специализированных сайтах, например [3]).

Эти наблюдения привели к развитию спектрального анализа — мощного метода бесконтактного определения состава тел. В частности было установлено присутствие на солнце натрия и калия (Кирхгоф). Позднее (1868) Пьер Жансен и Норман Локьер практически одновременно обнаружили в спектре Солнца жёлтую линию, не соответствующую никакому из известных элементов — так был открыт гелий.⁴ Он был получен в лаборатории только в 1895 году Уильямом Рамзаем и именно спектроскопия подтвердила, что этот элемент совпадает с «солнечным» элементом гелием. Исследования Рамзая были отмечены Нобелевской премии по химии 1904 года.

Спектр излучения водорода показан на рисунке 2. Яркие линии, попадающие в видимую

⁴ Наблюдённая Жансеном и Локьером линия — это жёлтая D3 линия гелия с длиной волны около 587.7 нм.

часть спектра, называют серией Бальмера (длины волн четырёх видимых линий серии Бальмера: 656 нм, 486 нм, 434 нм и 410 нм). Серия Бальмера открыта Иоганном Бальмером в 1885 году. Кроме этого, известны серии спектральных линий в других областях спектра: серия Лимана (1906-1914) в ультрафиолетовой части спектра, серия Пашена (серия Ритца-Пашена) (1908) в инфракрасной части спектра, серии Бракетта (1922), Пфунда (1924), Хэмпфри (1953) и безымянные серии в области ещё более длинных волн.

Оказалось удивительным, что все линии спектра водорода могут быть описаны простой эмпирической формулой Ридберга: $\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n^2} \right)$. Здесь R_H — постоянная Ридберга

для водорода, равная 109737 см^{-1} , а целое число n_0 принимает разные значения для разных серий: $n_0=2$ для серии Бальмера, 1 — для серии Лимана, 3 — для серии Пашена, 4, 5 и 6 — для серий Бракетта, Пфунда и Хэмпфри соответственно. Аналогичной формулой (с другим значением постоянной Ридберга) описывались спектры других водородоподобных атомов.

При этом классическая теория не может объяснить ни причины для появления дискретных линий в спектре излучения элементов, ни происхождение такого простого алгебраического правила, связывающего длины волн спектральных линий.

Проблема 3. Фотозффект.

Первые наблюдения влияния света на электрические свойства относятся к 1839 году, когда французский физик А.Э.Беккерель обнаружил, что ток в электролите немного увеличивается при облучении катода светом. Следующим важным наблюдением было открытие в 1873 году английским инженером В.Смитом увеличения проводимости селена под действием сильного освещения — фактически это было открытие внутреннего фотозффекта.

Подробное исследование фотозффекта началось с опытов Г.Герца (1887). Герц исследовал приём электромагнитных волн, в качестве «индикатора» использовался искровой промежуток — при принятии катушкой антенны электромагнитной волны возникающая ЭДС индукции проявлялась в виде искрового разряда. Для облегчения наблюдения Герц поместил разрядник в затемнённую коробку со стеклянным окном. При этом он заметил, что длительность разряда уменьшается. При удалении стеклянного окна длительность разряда увеличивалась. При замене стеклянного окна кварцевым (прозрачным в ультрафиолетовой области спектра) уменьшения длительности не наблюдалось. По результатам этих опытов Герц установил, что прохождение искры облегчается при облучении разрядника ультрафиолетом.

Систематическое исследование фотозффекта было предпринято в 1888-1890 году Александром Георгиевичем Столетовым⁵ (исторический обзор результатов этих работ имеется в статье [4]). Он разработал ставшую классической при исследовании фотозффекта схему с двумя электродами: анодом-сеткой и сплошным катодом, к которым прикладывался внешний потенциал. В этих опытах А.Г.Столетов обнаружил возникновение фототока при облучении катода светом от вольтовой дуги. Столетову пришлось преодолеть много технических трудностей: например, напряжение до 200В на электродах приходилось получать набором элементов Вольта или подобных, свет вольтовой дуги был нестабилен по интенсивности (её питали от генератора, городской сети электроснабжения в лаборатории изначально не было) и для проведения количественных измерений пришлось разработать методику при которой в ходе опыта постоянно регистрировалась и интенсивность света.

⁵ А.Г.Столетов (1839-1896), русский физик, заслуженный профессор Московского университета

В результате опытов Столетовым установлен первый закон фотоэффекта (закон Столетова):

- фототок прямо пропорционален интенсивности падающего на фотокатод света (облучение анода не вызывает появления фототока).

В 1902 году Филипп фон Ленард (Нобелевский лауреат по физике 1905 года за работы по «катодным лучам» - т.е. за исследования потока электронов от катода в вакуумной трубке) установил, что запирающее напряжение, останавливающее фототок, определяется длиной волны облучающего излучения, а не его интенсивностью, причём с уменьшением длины волны запирающее напряжение растёт. По техническим причинам (быстрое окисление фотокатода) Ленард не смог получить количественных результатов, связывающих длину волны (частоту) излучения с величиной запирающего напряжения. Позднее, уже после появления работы Эйнштейна по фотоэффекту, Милликен провел серию точных опытов⁶ (1905-1916), в которых качественные наблюдения Ленарда были подтверждены. Результаты опытов Милликена и Ленарда обобщаются в ещё два закона фотоэффекта:

- максимальная скорость фотоэлектронов (величина запирающего напряжения) определяется только частотой излучения и не зависит от частоты.
- существует зависящая от материала фотокатода «красная граница фотоэффекта»: при облучении фотокатода излучением с длиной волны меньшей граничной фототок не возникает.

С точки зрения классической теории, о фотоэффекте можно было бы рассуждать, как о взаимодействии электронов катода с полем падающей волны. В рамках этих представлений закон Столетова (зависимость фототока от интенсивности излучения) выглядит достаточно естественно: чем больше интенсивность, тем больше амплитуды поля в волне, тем сильнее они действуют на электроны, тем больше электронов создаёт фототок.

Однако классическая теория не может объяснить существование красной границы фотоэффекта (ниже которой никакая⁷ интенсивность излучения не приводит к фототоку!), зависимость максимальной скорости электронов только от частоты излучения, а также безинерционность фотоэффекта (практически мгновенное возникновение фототока при начале засветки катода).

Проблема 4. Излучение чёрного тела.

Абсолютно чёрным телом в физике называют тело, которое поглощает все падающее на него излучение. Эта концепция была введена Кирхгофом в 1862 году. Если абсолютно чёрное тело находится в термодинамическом равновесии с окружающей средой, оно не только поглощает излучение, но и излучает само — это просто требование закона сохранения энергии. Из-за этого такое «абсолютно чёрное» тело визуально имеет цвет. Примером может служить раскалённый уголь в печке — на вид он красный, однако он поглощает падающее на него излучение, в чем легко убедиться посветив на него чем-либо. Задача о «цвете» этого

6 Историческим курьёзом является то, что Милликена к проведению этих опытов простимулировало недоверие к теории фотоэффекта Эйнштейна — однако именно качественное выполнение этих опытов подтвердило теорию с высокой точностью.

7 Точнее, ниже красной границы фотоэффекта возможен *многоквантовый фотоэффект*, когда энергия нескольких квантов тратится на вырывание из катода единственного электрода. Однако наблюдение многоквантового фотоэффекта стало возможно только с появлением лазеров, никакие другие источники света не создают достаточную интенсивность. Мы приведём пример эксперимента по многоквантовому фотоэффекту при более подробном рассмотрении этого явления.

собственного излучения (точнее о его спектре) — это одна из важных задач термодинамики и теории электричества.

Й.Стефан (1879, эмпирически) и Л.Больцман (1884, с использованием теории Максвелла) установили закон (закон Стефана-Больцмана) связывающий полный поток излучения от абсолютно чёрного тела с его температурой: $\frac{P}{S} = \sigma T^4$, где σ - т.н. постоянная Стефана-Больцмана. Закон подтвержден экспериментально Л.Гретцем в 1880 году.

В 1893 году В.Вин, используя термодинамику и теорию электричества, вывел первый закон Вина для спектральной плотности излучения черного тела: $\frac{dP}{d\nu} = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right)$. Отсюда, в частности следует закон смещения Вина: положение максимума ν_{max} в спектре излучения чёрного тела определяется только его температурой, $\nu_{max} = AT$. За эти работы Вин был удостоен Нобелевской премии по физике 1911 года.

Однако точный вид спектральной функции излучения чёрного тела вывести из классических соображений невозможно. В 1900 году Рэлей вывел спектральную функцию из классических соображений, этот вывод был приведён в более строгую форму Джинсом (1905). Согласно закону Рэлей-Джинса, излучаемая с единицы поверхности в интервале частот

$d\nu$, равна $\frac{dP}{d\nu} = \frac{2\nu^2 kT}{c^2}$. При низких частотах предсказания классической теории

соответствуют опыту. Однако, с ростом частоты спектральная плотность $\frac{dP}{d\nu}$ неограниченно возрастает, так что полная излучённая энергия оказывается бесконечно велика. Полученный вывод получил название «ультрафиолетовой катастрофы». Вин на основании эмпирических соображений предложил в 1896 году другой вид спектральной функции, лишённый этой проблемы (второй закон Вина): $\frac{dP}{d\nu} = C_1 \nu^3 e^{-C_2 \nu/T}$. Но эта формула не описывает правильно низкочастотное поведение, кроме этого, в ней содержатся неизвестные константы C_1 и C_2 .

Применение классической теории приводит к «ультрафиолетовой катастрофе», классическая теория не в состоянии последовательно описать свойства излучения абсолютно чёрного тела.

Проблема 5. Теплоёмкость твёрдых тел и газов при низкой температуре.

В 1819 году французские физики Дюлонг и Пти обнаружили, что молярная теплоёмкость практически всех простых твёрдых тел при комнатной температуре составляет примерно 25 Дж/(моль·К). В этом легко убедиться по табличным данным из справочников (данные при комнатной температуре):

Вещество	Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К)	Молярная масса, кг/моль	Молярная теплоёмкость, Дж/(моль·К)
Алмаз	502	$12 \cdot 10^{-3}$	6.02
Железо	444	$55.8 \cdot 10^{-3}$	24.8

Свинец	130	$207.2 \cdot 10^{-3}$	26.9
Литий	3582	$6.94 \cdot 10^{-3}$	24.9
Вольфрам	134	$184 \cdot 10^{-3}$	24.7
Золото	129	$197 \cdot 10^{-3}$	25.4
Медь	385	$63.5 \cdot 10^{-3}$	24.4
Бериллий	1824	$9.01 \cdot 10^{-3}$	16.4

Обоснование этого правила окончательно сложилось с доказательством Людвигом Больцманом теоремы о равномерном распределении (1876). Согласно этой теореме в равновесии средняя энергия распределена равномерно между всеми независимыми степенями свободы системы. Энергия, приходящаяся на одну «кинетическую» степень свободы связана с температурой — это $\frac{1}{2}kT$. В твёрдом теле степени свободы атомов в кристалле являются колебательными степенями свободы, при колебаниях средняя кинетическая и средняя потенциальная энергии равны, поэтому энергия на колебательную степень свободы вдвое больше. Наконец, у каждого атома есть три степени свободы (по числу координат). Таким образом, по теореме о равномерном распределении на моль твёрдого тела приходится тепловая энергия $3kN_A T = 3RT$ (R – универсальная газовая постоянная), а молярная теплоёмкость равна $3R = 24.9 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{K)}$.

Из той же теоремы о равномерном распределении следует привычное нам правило о теплоёмкости идеального газа: для одноатомного газа $c_V = \frac{3}{2}R$, для двухатомного $c_V = \frac{5}{2}R$, для трёх- и более атомного $c_V = 3R$.

Однако эксперимент не полностью соответствует этой простой и понятной картине. Уже в 1872 году Д.Ф.Вебер обнаружил [5], что теплоёмкость некоторых твёрдых тел (бора, кремния, графита, алмаза) зависит от температуры (рисунок 4).

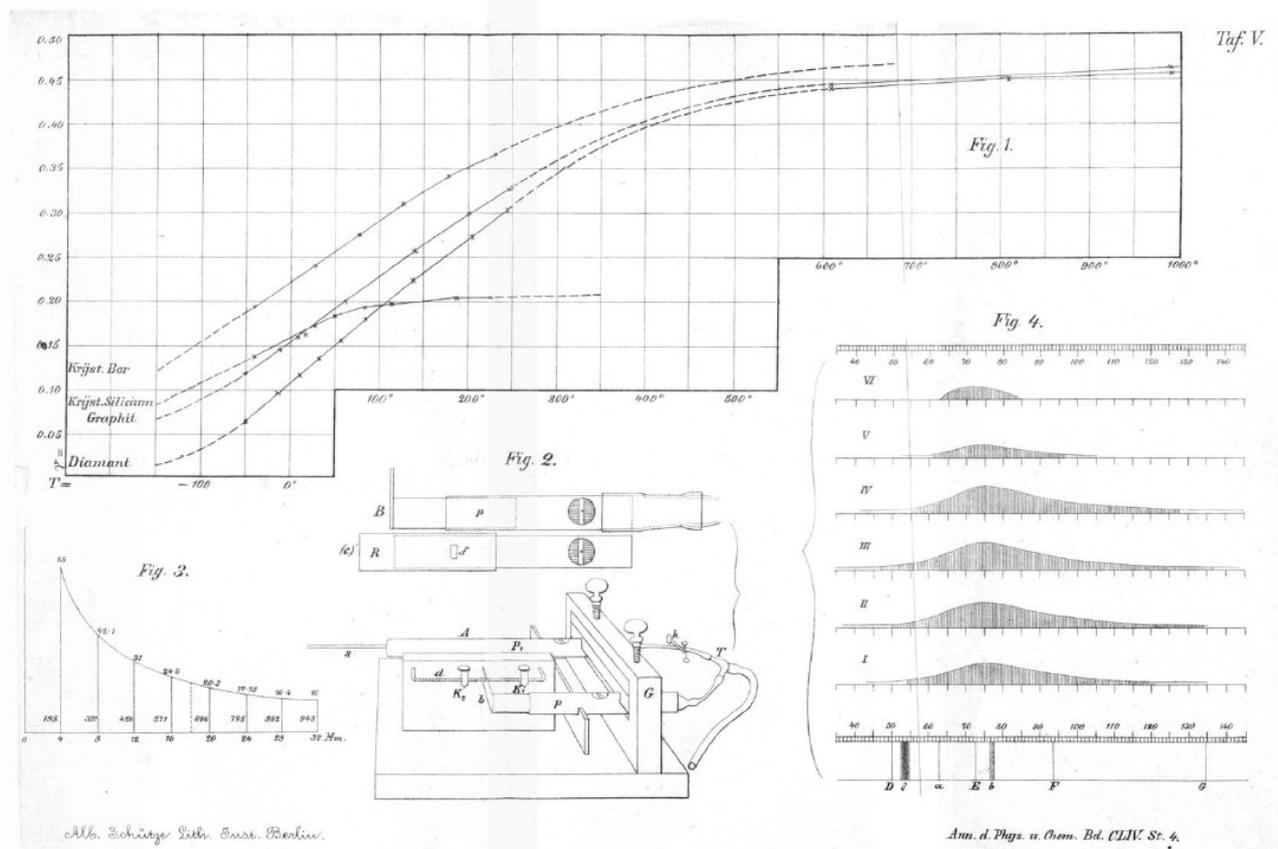


Рисунок 4: Зависимости теплоёмкости бора, кремния, графита и алмаза от температуры. Из статьи [5].

С появлением сжиженных газов физикам стали доступны низкие температуры, и оказалось, что при дальнейшем понижении температуры теплоёмкость продолжает уменьшаться и уменьшается до нуля. Эти исследования, в частности, проводились Дьюаром (1905), Нернстом (1911). В качестве примера [6], на рисунке 5 приведена зависимость теплоёмкости алмаза от температуры

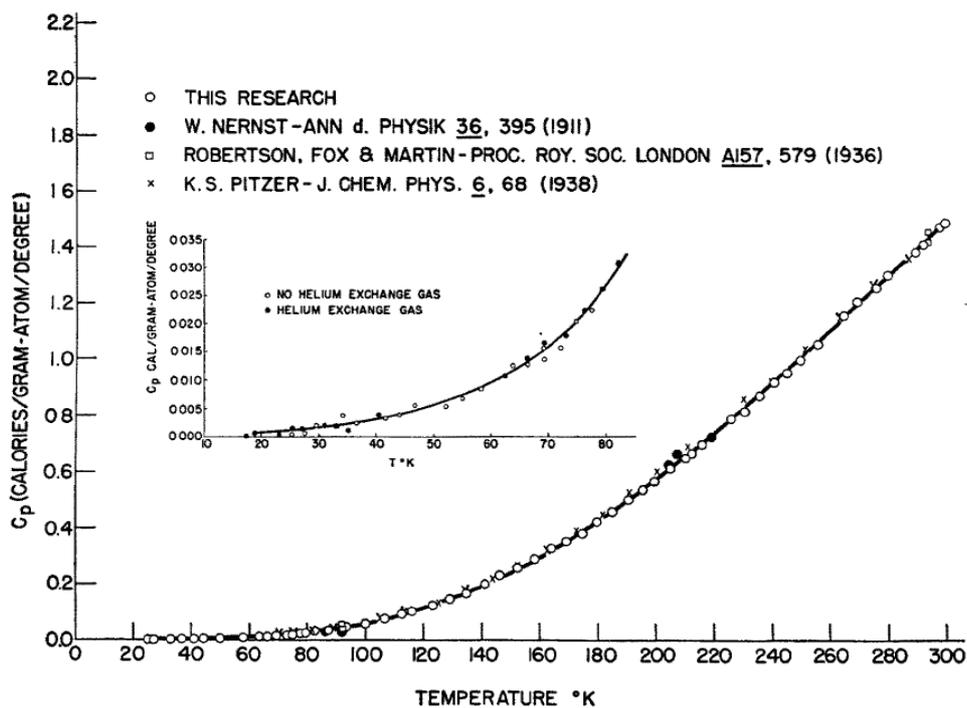


FIG. 1. Low temperature specific heat of diamond; this research and previous investigations.

Рисунок 5: Зависимость теплоёмкости алмаза от температуры при низких температурах. Из статьи [6].

Так же не все хорошо оказалось с теплоёмкостью газов — она на поверку тоже оказалась зависящей от температуры, что не соответствовало теореме о равнораспределении. Например, для молекулярного водорода при понижении температуры «пропадает» часть теплоёмкости, соответствующая (по теореме о равнораспределении) вращательным степеням свободы [7](рисунок 6). То есть при низких температурах двухатомная молекула начинает вести себя как одноатомная.

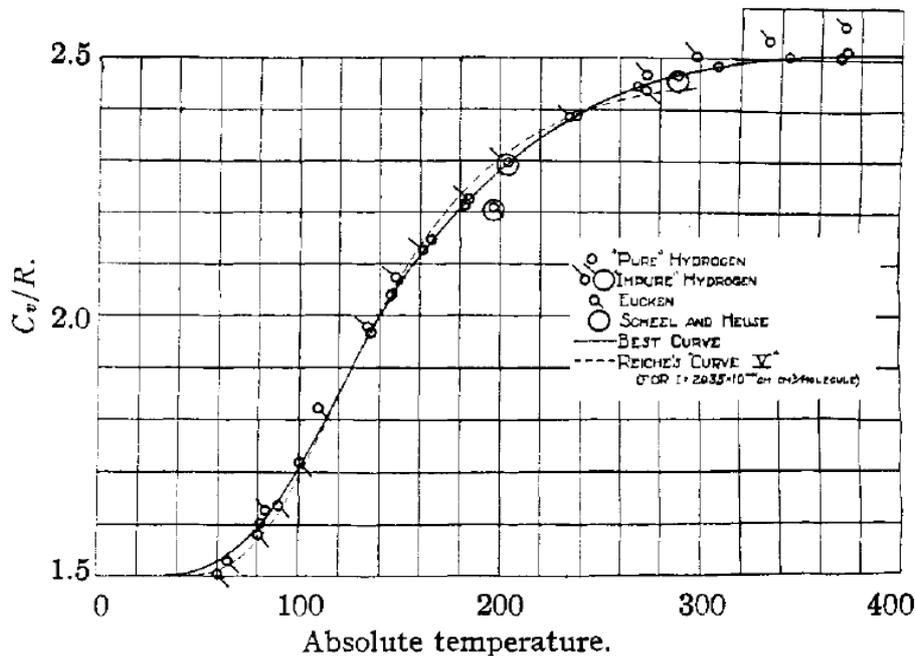


Fig. 3.—Specific heat of hydrogen.

Рисунок 6: Теплоёмкость газообразного водорода при низких температурах. Из статьи [7].

Более того, оказалось, что при повышении температуры теплоёмкость газов, состоящих из многоатомных молекул, увеличивается по сравнению со значением, определяемым теоремой о равномерном распределении. Например, для окиси углерода (двухатомная молекула CO , предсказание теоремы о равномерном распределении: $c_v/R=5/2$) Шеррат и Гриффитс получили [8] в 1934 году результаты для c_v , показанные на рисунке 7. Видно, что при температуре более $1000^\circ C$ наблюдаемое значение c_v/R оказывается больше трёх.

Temperature $^\circ C$	$\beta \times 10^5$ second	Experi- mental	C_v/R		
			Planck Einstein	Gordon and Barnes	Kassel
1000	1.0	3.147	3.127	3.150	3.135
1200	1.2	3.257	3.204	3.231	3.215
1400	1.15	3.261	3.260	3.291	3.273
1600	1.1	3.305	3.302	3.338	3.320
1800	1.0	3.368	3.334	3.376	3.354

Рисунок 7: Таблица экспериментальных результатов для теплоёмкости окиси углерода при высоких температурах. Экспериментальные данные для отношения c_v/R приведены в третьем столбце, в следующих столбцах - сравнение с разными моделями. Из статьи [8].

А для двуокиси углерода (трехатомная молекула CO_2 , предсказание теоремы о равномерном распределении: $c_v=3R=24.9 \text{ Дж}/(K \cdot \text{моль})=5.9 \text{ кал}/(K \cdot \text{моль})$) они же двумя годами позже получили [9] аналогичные результаты: значение близкое к предсказанию теоремы о равномерном распределении наблюдается при комнатной температуре, но при нагреве до $1000^\circ C$ теплоёмкость газа возрастает вдвое (рисунок 8).

The specific heat values obtained are given below:

Temperature °C.	C_v cal./gm. mol. at 1 atmosphere pressure		
	Present investigation	I.C.T.	Spectroscopic
0	6·62	6·63	6·67
200	8·65	7·60	8·49
400	10·06	8·48	9·80
600	10·81	9·15	10·64
800	11·30	9·72	11·21
1000	11·76	10·17	11·61

The figures in the column denoted by I.C.T. are based on data given in the International Critical Tables.

Рисунок 8 Таблица экспериментальных результатов для теплоёмкости окиси углерода при высоких температурах. Экспериментальные данные (в единицах кал/(К·моль)) приведены по результатам нескольких исследований. Из статьи [9].

Все эти наблюдения показывают, что количество «активных» степеней свободы, для которых верна теорема о равномерном распределении оказывается зависящим от температуры. Классическая физика не может объяснить причин такой «активации».

Фотон и другие квазичастицы.

Во избежание путаницы в терминах в дальнейшем изложении необходимо немного обсудить, что такое «фотон». О фотоне часто говорят как о «частице», некотором «световом мячике» с определёнными энергией и импульсом. Это наглядное представление в чём-то является данью механистичности нашего воображения, складывающегося в результате повседневного опыта, а в чём-то отголоском корпускулярной теории света.

Строго говоря, фотон — это просто короткое слово для обозначения кванта электромагнитного излучения. Существование у фотона импульса — это не есть новое предположение квантовой теории. Уже в классической электродинамике было показано, что электромагнитная волна переносит не только энергию, но и импульс. Собственно, любые волны переносят и энергию, и импульс — передача импульса и энергии к волне/от волны возникает при рождении/поглощении волны. Например, при ударе импульс бьющего тела переходит в импульс звуковых волн в «мишени», а импульс звуковых волн, в свою очередь, может передаться телу, стоящему за «мишенью». Примером такой системы с передачей импульса к волнам и от волн является хорошо известная из механики демонстрация: маятник Ньютона с несколькими подвешенными металлическими шарами.

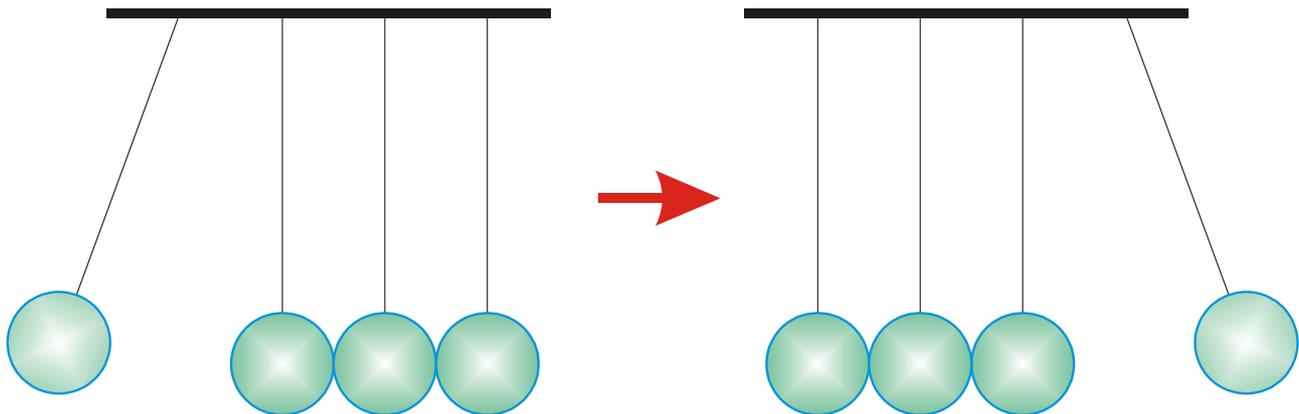


Рисунок 9: Схематическое изображение "маятника Ньютона". Крайний левый шарик ударяет по цепочке шаров и передаёт свой импульс крайнему правому шару. Импульс переносится волной деформации, бегущей по цепочке шаров.

Классическая электродинамика задаёт связь между энергией и импульсом электромагнитной волны в вакууме: $P = \frac{E}{c}$.

Соответственно, если энергия передаётся порциями-квантами $h\nu$, то импульс каждого кванта: $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$.

Представление о фотоне, как о локализованной частице («мячике»), тоже не верно — это опять некоторое механистическое упрощение. Фотон делокализован. Фотон — это квант монохроматической световой волны. Как известно из математики (утверждение следует из преобразования Фурье), идеально монохроматическая волна неограниченна в пространстве.

Кроме того, в отличие от «настоящих» частиц классической механики для фотонов не действует закон сохранения числа частиц, фотон может существенно изменяться в ходе взаимодействия со средой: он может менять частоту (на языке «механической» аналогии это приводит, например, к странным превращениям «красных» корпускул в «синие»), в некоторых условиях распадаться на два фотона (или наоборот), закон дисперсии (связи энергии и импульса) в среде зависит от свойств среды и может принимать весьма неожиданные формы.

Из-за этих отличий от «настоящих» частиц фотон называют квазичастицей («почти-частицей»). Квазичастица в физике — это обычный способ описания каких-то колебаний в среде или способ описания задач многих тел. Например:

- фотон — квазичастица, описывающая колебания электромагнитного поля;
- фонон — квазичастица, описывающая упругие (звуковые) волны в среде;
- магنون — квазичастица, описывающая колебания намагниченности в ферро- или антиферромагнетике;
- дырка — квазичастица, описывающая «недостающий» электрон в полупроводнике;
- электрон в проводнике тоже является квазичастицей.⁸

⁸ Из-за взаимодействия электронов и ионной решётки дисперсионное соотношение искажается: вместо квадратичного соотношения $E = \frac{p^2}{2m}$ для свободного электрона возникает своеобразная зонная

Разница между квазичастицами и элементарными частицами пропадает в некоторых космологических теориях и в физике высоких энергий, но это сильно выходит за рамки нашего курса. Важно запомнить, что фотон — это не частица в классическом («механическом») понимании этого слова. Это квант электромагнитного поля, обладающий определёнными энергией и импульсом (а также, вообще говоря, моментом импульса). Соответственно, при процессах взаимодействия электромагнитного излучения с веществом должны выполняться законы сохранения энергии и импульса.

Фотоэффект.

История обнаружения эффекта и законы внешнего фотоэффекта.

Фотоэффекту традиционно уделяется внимание в школьной программе физики. Так как явление внешнего фотоэффекта достаточно просто для понимания, мы не будем долго задерживаться на теории этого явления.

Напомним вкратце историю вопроса:

- 1887 год: Г.Герц обнаружил влияние ультрафиолетового излучения на разряд индуктора
- 1888-1891 год: опыты Столетова (постановка классической схемы опыта по фотоэффекту, связь фототока с освещённостью катода)
- 1902 год: опыты фон Ленарда (зависимость запирающего напряжения от длины волны)
- 1905 год: теория фотоэффекта А.Эйнштейна
- 1905-1916 годы: опыты Милликена.

Результаты наблюдений выражаются в форме трех законов фотоэффекта (приводим их в современной формулировке):

1. (из опытов Столетова) При неизменном спектральном составе света, падающего на фотокатод, фототок пропорционален освещённости катода.
2. (из опытов фон Ленарда и Милликена) Для данного фотокатода максимальная начальная скорость фотоэлектронов зависит только от частоты света и не зависит от интенсивности.
3. (из опытов фон Ленарда и Милликена) Для каждого фотокатода существует красная граница фотоэффекта — то есть частота $\nu_{кр}$ такая, что при частоте освещающего фотокатод света ниже $\nu_{кр}$ фототок невозможен.
4. (по совокупности опытов) Фототок возникает сразу же после начала облучения катода.

Все эти эмпирические законы объединены в уравнении Эйнштейна для фотоэффекта, являющегося, фактически, законом сохранения энергии с учётом гипотезы Планка о дискретности поглощения энергии электромагнитной волны:

структура проводника, а эффективная масса электрона в проводнике может заметно отличаться от массы свободного электрона.

$$h\nu = \frac{mV^2}{2} + A ,$$

здесь V — скорость фотоэлектрона сразу после выхода из катода, A — «работа выхода», то есть работа, которую надо совершить против электростатических сил для того чтобы перевести электрон из металла фотокатода во внешнее пространство. Работа выхода зависит от материала фотокатода. Типичный масштаб работы выхода — несколько электрон-вольт.⁹ Работа выхода для некоторых материалов представлена в таблице ниже (по сайту [10]):

Элемент	A , эВ						
Ag	4.52-4.74	U	3.63-3.90	Cr	4.5	Fe	4.67-4.81
Li	2.93	Si	4.60-4.85	In	4.09	Pt	5.12-5.93
Na	2.36	Hg	4.475	Sm	2.7	Ni	5.04-5.35
Zn	3.63-4.9	Au	5.1-5.47	Cu	4.53-5.10	Eu	2.5

Длина волны красной границы фотоэффекта легко определяется из закона фотоэффекта:

$$h\nu_{кр} = \frac{hc}{\lambda_{кр}} = A$$

$$\lambda_{кр} = \frac{hc}{A} = \frac{1240}{A[\text{эВ}]} \text{ нм} ,$$

таким образом, у большинства «химически чистых» фотокатодов красная граница фотоэффекта будет лежать в области ультрафиолетового ($\lambda < 400 \text{ нм}$) излучения. Подбор материала для фотокатода, работающего в видимом диапазоне — это отдельная, достаточно сложная технологическая задача.

Отметим, что закон сохранения импульса для системы «квант света-электрон» при фотоэффекте не выполняется: фотоэлектрон движется в ту сторону, откуда пришла поглощённая волна. «Недостающий» импульс передаётся массивному фотокатоду.

За разработку теории фотоэффекта А.Эйнштейну была присуждена Нобелевская премия 1921 года. Р.Милликену, в том числе и за его работы по фотоэффекту, достоверно подтвердившие теорию А.Эйнштейна, была присуждена Нобелевская премия 1923 года. Ф.фон Ленарду была присуждена Нобелевская премия 1905 года за работы по катодным лучам.

Интересно отметить, что стимулом для работ Р.Милликена в области фотоэффекта было желание опровергнуть «неклассическую» теорию фотоэффекта Эйнштейна. И в качестве печального исторического предостережения, показывающего, что и учёные, независимо от величины научных заслуг, могут поддаваться политическим или иным течениям, можно отметить что Ф. фон Ленард (как и Й.Штарк, Нобелевский лауреат по физике 1919 года) с 20-х годов XX века стал сторонником и пропагандистом «немецкой» (или «арийской») физики.

⁹ Один электрон-вольт равен энергии, приобретаемой электроном при прохождении разности потенциалов в 1В, он равен $1.6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$. Эта единица измерения и ее производные (кило электрон-вольт, мега электрон-вольт) распространены в атомной и ядерной физике. Удобство связано с тем, что внутриатомные масштабы энергии измеряются обычно как раз десятками-сотнями-тысячами электронвольт.

Внутренний и многоквантовый фотоэффект.

Рассмотренное нами выше явление фотоэффекта называют также внешним фотоэффектом. Термин «внешний» используется чтобы подчеркнуть, что электроны выходят из металла во внешнее пространство. Помимо внешнего фотоэффекта существует ещё и внутренний фотоэффект, наблюдаемый в полупроводниках или диэлектриках, когда под действием облучения освобождаются связанные электроны (то есть электроны, локализованные вблизи ионов), но они остаются внутри материала и, таким образом, в материале появляются свободные носители заряда, что приводит к изменению (или даже возникновению) проводимости. Принципиально внутренний фотоэффект не отличается от внешнего, его формальное описание также сведётся к закону сохранения энергии. Однако формальное описание этого явления потребует объяснения того, как движутся электроны внутри кристалла, что оказывается сильно выходящим за рамки этого курса. Отметим лишь, что именно внутренний фотоэффект используется в различных полупроводниковых приборах — от датчиков освещённости и автоматических выключателей света до солнечных батарей.

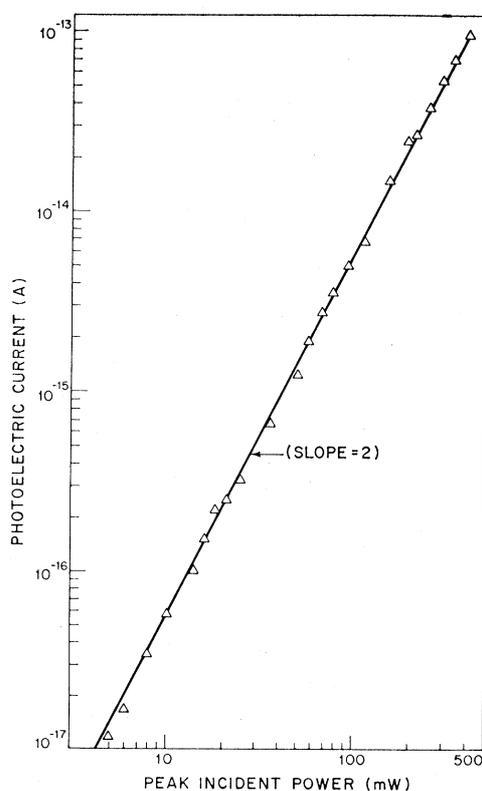


Рисунок 10: Зависимость фототока от освещённости фотокатода (падающей мощности). Из работы [11].

Другим примером необычного фотоэффекта является многоквантовый фотоэффект, при котором энергия нескольких квантов электромагнитного излучения идёт на извлечение из металла всего одного фотоэлектрона. Закон сохранения энергии для многоквантового фотоэффекта имеет вид:

$$N \cdot h\nu = \frac{mV^2}{2} + A ,$$

где N — количество квантов, участвующих в процессе. Очевидно, что для реализации

многоквантового фотоэффекта несколько квантов света должны оказаться «в одном месте, в одно время», то есть требуется большая интенсивность излучения. Поэтому наблюдение такого процесса стало возможным только с появлением лазеров, создающих интенсивное излучение. Первые опыты по многоквантовому фотоэффекту были проделаны в 1960-х годах [11].

У многоквантового фотоэффекта есть несколько особенностей, которые не подчиняются привычным законам фотоэффекта. Во-первых, как легко заметить, многоквантовый фотоэффект возможен при частотах излучения меньших, чем красная граница одноквантового фотоэффекта. Красная граница N -квантового фотоэффекта, очевидно, оказывается в N раз меньше (по частоте), чем красная граница одноквантового фотоэффекта. Во-вторых, для многоквантового фотоэффекта не верен закон Столетова: фототок оказывается пропорционален N -ой степени интенсивности излучения $I \propto W^N$.

На рисунке 10 приведена зависимость фототока от интенсивности излучения из одной из первых работ по двухквантовому фотоэффекту. Измерения выполнялись при энергии фотонов 1.48 эВ, в то время как работа выхода для натрия, использовавшегося в качестве фотокатода, составляет 2.36 эВ. То есть одноквантовый фотоэффект невозможен в принципе. В опытах лазерный луч фокусировался в пятно площадью примерно $2 \times 10^{-5} \text{ см}^2$ и интенсивность излучения составляла 10^8 Вт/м^2 . Для сравнения напомним, что полная интенсивность солнечного излучения на земной орбите составляет около 1400 Вт/м^2 .

Практические применения фотоэффекта.

Вакуумные фотоэлектронные умножители.

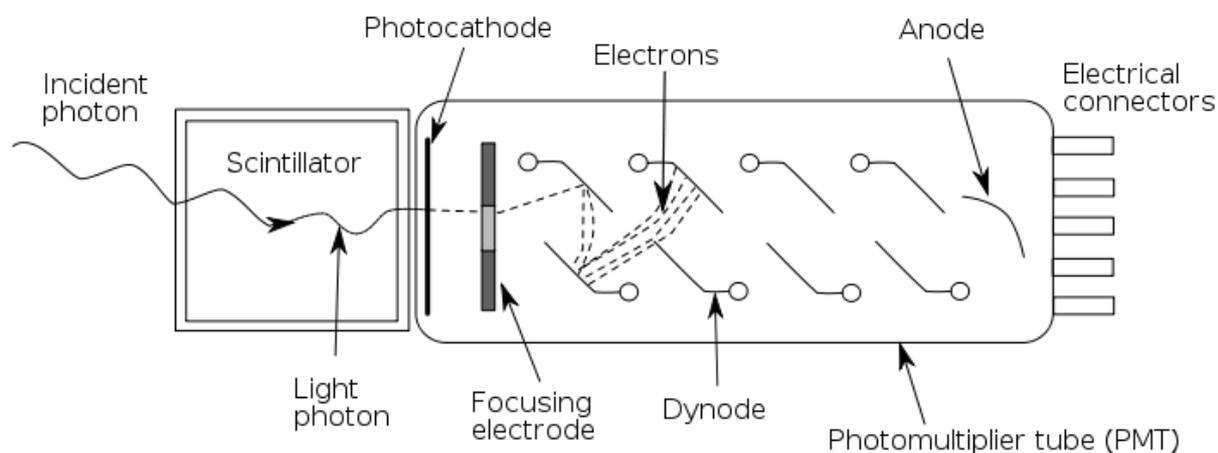


Рисунок 11 Сверху: общий вид одного из ФЭУ и крупный план системы ускоряющих электродов. Снизу: схема ФЭУ со сцинтиляционным экраном, используемого при детектировании частиц. С сайта <http://em.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier>

Вакуумные фотоэлектронные умножители (ФЭУ) являются прямыми наследниками вакуумного фотодиода, фактически имевшегося уже в опытах Столетова. За фотокатодом устанавливают несколько дополнительных электродов, на которые подают ускоряющее электроны напряжение (обычно около 100 В). Эта конфигурация позволяет добиться превращения одного фотоэлектрона в лавину вторичных электронов: ускоренный до энергии 100 эВ электрон выбивает несколько электронов их электрода, эти электроны ускоряются к следующему электроду и так далее. В результате получается импульс тока, который может быть измерен. В принципе, эта конструкция позволяет достичь достаточной

чувствительности для регистрации отдельных фотонов. Фотоэлектронный умножитель является одним из немногих вакуумных приборов не отдающих свои позиции полупроводниковой технике. Это связано с высокой чувствительностью ФЭУ, большим внутренним коэффициентом усиления, малым темновым (в отсутствие освещения) током. ФЭУ применяют в приборах ночного видения, различных схемах анализа (в том числе медицинских), в сочетании со сцинтиляционным экраном — для регистрации частиц в ядерной физике. На рисунках ниже приведен внешний вид и схема ФЭУ

Фотодиоды, фоторезисторы.

Фотодиоды, фоторезисторы и другие полупроводниковые приборы, работающие на явлении внутреннего фотоэффекта, встречаются во многих бытовых приборах. Это и простейшие датчики освещения, и приёмники излучения в приводах оптических компакт-дисков. Матрицы цифровых фотоаппаратов и видеокамер тоже состоят из полупроводниковых фотоэлементов (за разработку этой технологии Виллард С. Бойл и Джордж Е. Смит были удостоены Нобелевской премии по физике 2009 года). Выигрывая в компактности и стоимости, полупроводниковые фотоэлементы уступают вакуумным ФЭУ там, где требуется высокая чувствительность или быстрое время отклика.

Солнечные батареи.

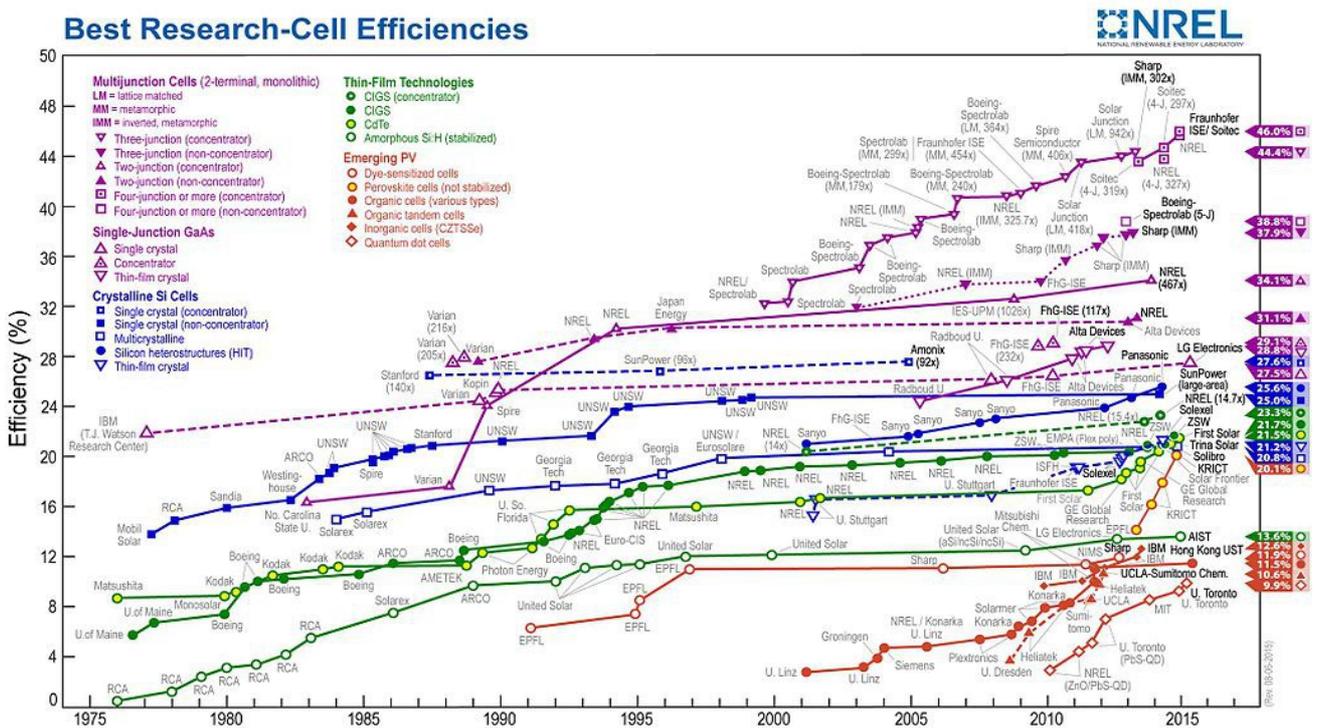


Рисунок 12: Прогресс в КПД (коэффициенте преобразования энергии) солнечных батарей. С сайта https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell_efficiency.

Солнечные батареи являются источником энергии, который за счёт фотоэффекта преобразует энергию падающего света в электричество. Простейшим примером такой батареи является вакуумный фотоэлемент из задачи 5.

Плюсом такого источника энергии является отсутствие загрязнения окружающей среды в месте расположения станции. Однако, во избежание излишнего оптимизма необходимо

подчеркнуть следующие ограничивающие факторы. Интенсивность солнечного излучения на орбите Земли составляет всего 1400 Вт/м^2 . Однако на поверхности Земли (в Европе) из-за облачности эта цифра может падать до 100 Вт/м^2 , а ночью, естественно, до нуля. С учётом того, что КПД солнечных панелей составляет 10-40% (рисунок 12), получаем, что для стабильной выработки заметной мощности требуется большая площадь батареи.

Чтобы обеспечить стабильное потребление мощности на уровне 10 кВт потребуется площадь панелей около 1000 м^2 . При этом необходимо поддерживать эту площадь чистой от грязи и пыли. Кроме того, важны и экономические соображения: себестоимость киловатт-часа электроэнергии произведённого солнечными батареями составляла в 2010 году примерно 0.2 доллара США, а себестоимость киловатт-часа на других электростанциях была примерно в пять раз меньше. Тем не менее, солнечные батареи точно оказываются оправданы там, где потребление невелико, а возможности подключения к другим источникам нет — например для питания удалённых метеостанций, либо в охраняемых природных заповедниках, где загрязнение недопустимо, и, конечно, в космосе, где солнечные батареи успешно работают уже около 50 лет.



Рисунок 13: Поле солнечных батарей электростанции Вальдполенц, ФРГ. С сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Waldpolenz_Solar_Park

Строительство больших солнечных электростанций является во многом более политическим шагом, чем экономически оправданным проектом, однако есть примеры строительства достаточно мощных станций. Список крупных станций можно найти например на сайте [12]. Как правило, солнечные электростанции строят в южных районах (Индия, Испания, Калифорния). Из европейских стран с климатом, в некоторой степени сравнимым с российским, можно отметить большое количество таких станций в Германии — но это во многом связано с ростом популярности «зелёных» партий в Германии в начале 2000-х.

Одна из крупнейших станций: Waldpolenz Solar Park, построена в 2008 году в Германии в окрестностях Лейпцига (рисунок 13). Площадь поля солнечных батарей по первоначальному проекту¹ около 100 гектар, номинальная мощность станции около 40 МВт, выработка электроэнергии 40 миллионов кВт-часов в год.

¹ Мощность станции была увеличена до 52 МВт в 2011 году за счёт установки дополнительных панелей.

Для сравнения, мощность одной из старейших гидроэлектростанций — Днепрогэс (введена в строй в 1932-1939 годах) примерно 1500 МВт сейчас (560МВт — проектная мощность, достигнутая в 1939 году), а выработка электроэнергии на ней сейчас около 4000 миллионов кВт-часов в год. Нижегородская ГЭС (пущена в 1955-1956 годах) имеет номинальную мощность 520 МВт и годовую наработку 1513 млн. кВт-часов при площади зеркала бассейна ГЭС около 1600 км². Саяно-Шушенская ГЭС (введена в 1978-1985 годах) при мощности 6400 МВт, годовой наработке 23500 миллионов кВт-часов имеет площадь зеркала 620 км².

Таким образом, на Нижегородской ГЭС годовая выработка энергии в расчёте на площадь зеркала составляет около 1 миллиона кВт-часов с квадратного километра, на Саяно-Шушенской — около 40 миллионов кВт-часов с квадратного километра, а у солнечной электростанции Вальдполенц также около 40 миллионов кВт-часов с квадратного километра.