

**Министерство образования Российской Федерации  
Саратовский государственный университет  
имени Н. Г. Чернышевского**

**«Общая физика»**

**(Часть 5: Квантовая оптика и атомная физика)**

**Учебное пособие**

**Саратов 2014**

**В учебном пособии в определенном порядке скомпилирован апробированный (очное, заочное и дистанционное обучение) материал по Квантовой оптике и атомной физике (часть 5 курса «Общая физика»). Приведены теоретические сведения и даны примеры решения типовых задач.**

**Учебное пособие предназначено для студентов технических специальностей.**

**Разработано в соответствии с Государственным стандартом высшей школы.**

**Рецензенты:**

**Кафедра Теоретической и ядерной физики СГУ,  
Д.ф.-м.н., профессор А.Г.Лазерсон**

**Авторы-составители:**

**д.ф.-м.н., проф. СГУ Лавкин А.Г.,  
д.т.н., проф. СГУ, СГТУ Антонов И.Н.,  
вед. инженер СГУ Мысенко М.Б.**

# Содержание

## Введение

Тепловое лучеиспускание и лучепоглощение.

Абсолютно черное тело.

Законы излучения абсолютно черного тела.

Квантовый характер излучения.

Строение атома (ядерная модель). Дискретность энергетических состояний атома.

Квантовая теория строения атома водорода.

Объяснение спектров излучения и поглощения водорода

Понятие о строении многоэлектронных атомов и образовании оптических и рентгеновских (характеристических) спектров

Люминесценция. Законы фотолюминесценции и некоторые ее практические применения

Фотоэффект. Законы фотоэффекта. Фотоэлементы

Масса и импульс фотона. Световое давление.

Эффект Комптона. Флуктуации света

Задачи

Приложения

1. Практические занятия.
2. Список вопросов к зачету (экзамену) по курсу «Общая физика»
3. Перечень средств обучения.
4. Литература (основная, дополнительная).

## Введение

**«Общая физика» представляет собой дисциплину, являющуюся одной из центральных в системе образования студентов технических специальностей в средних и высших учебных заведениях. Главная цель при ее изучении – освоить фундаментальные понятия каждой из областей физики, ориентироваться в их взаимосвязи, приобрести навыки практической работы – решение задач и выполнение лабораторных работ.**

**Дисциплина «Общая физика» имеет междисциплинарный характер, активно содействует развитию других научных направлений и осуществляет интерактивную функцию в системе наук. В связи с этим «Общая физика» представляется мощным средством для формирования мировоззрения, а также важнейшим элементом культуры.**

**В этом курсе изучаются фундаментальные понятия и сложность этого курса заключается в том, что многие разделы достаточно сложны и требуют математической подготовки.**

**В курсе по дисциплине «Общая физика» изучаемый материал распределен на модули, модули разделены на отдельные занятия. Освоение материала контролируется практическими работами и контрольными вопросами.**

## **Требования к знаниям**

**В итоге изучения курса студент должен знать:**

**Определения основных физических величин.**

**Формулировки основных законов физики**

**О взаимосвязи между различными разделами физики.**

**О фундаментальных физических экспериментах, послуживших обоснованию физических законов.**

**Об основных технических применениях достижений физики.**

**О проявлениях физических законов в различных природных явлениях**

**О взаимосвязи физики с другими естественными науками.**

**О принципе относительности.**

**О принципе дополнительности.**

## **Требования к умениям**

**Студент должен уметь:**

**Использовать физические величины при формулировке физических законов, находить их размерности.**

**Правильно применять физические законы при решении задач физики.**

**Давать научную трактовку результатам, полученным в лабораторном физическом эксперименте.**

**Объяснять наблюдаемые природные явления на основе физических законов.**

**Применять принцип относительности.**

**Формулировать положения о корпускулярно – волновом дуализме материальных частиц.**

## Тепловое лучеиспускание и лучепоглощение.

### Абсолютно черное тело.

Электромагнитное излучение обусловлено, как неоднократно отмечалось, колебаниями электрических зарядов, в частности зарядов, входящих в состав атомов и молекул вещества. Так, например, колебательное и вращательное движения молекул и атомов создают инфракрасное излучение, определенные перемещения электронов, создают видимое и ультрафиолетовое излучение, торможение свободных электронов создает рентгеновское излучение и т. д.

Самым распространенным в природе видом электромагнитного излучения является тепловое излучение, или лучеиспускание; оно совершается за счет энергии теплового движения атомов и молекул вещества, т. е. за счет внутренней энергии вещества, и потому, ведет к охлаждению излучающего тела. Лучеиспускание присуще всем телам при любой температуре, отличной от абсолютного нуля.

Тепловое излучение имеет сплошной спектр, однако, распределение энергии в нем существенно зависит от температуры: при низких температурах тепловое излучение является преимущественно инфракрасным, при высоких температурах — видимым и ультрафиолетовым.

Всякое тело, излучая само, вместе с тем поглощает часть лучистой энергии, испускаемой другими (окружающими) телами; этот процесс называется лучепоглощением. Он ведет к нагреванию данного тела.

Очевидно, что, теряя энергию путем лучеиспускания и в то же время получая энергию путем лучепоглощения, данное тело должно в конце концов прийти в состояние теплового, или лучистого, равновесия, при котором потеря энергии за

счет лучеиспускания компенсируется притоком энергии за счет лучепоглощения. Температура, соответствующая этому состоянию, называется температурой лучистого равновесия.

Лучистое равновесие является обычным состоянием тел, предоставленных самим себе.

Для количественной оценки процессов лучеиспускания и лучепоглощения вводятся следующие характеристики.

Полная лучеиспускательная способность тела  $E$  — величина энергии, испускаемой с единицы площади поверхности тела за 1 с; измеряется в Дж/(м<sup>2</sup>-с).

Полная лучепоглощательная способность тела  $A$  — отношение лучистой энергии, поглощаемой телом, ко всей падающей на него лучистой энергии;  $A$  — безразмерная величина.

Значения  $E$  и  $A$  зависят от природы тела и температуры.

Опыт показывает, что величина энергии, испускаемой (поглощаемой) телом, различна для различных длин волн. В связи с этим вводится понятие спектральной лучеиспускательной (лучепоглощательной) способности.

Спектральной лучеиспускательной способностью тела  $E$  называется лучеиспускательная способность, рассчитанная для узкого интервала длин волн  $\Delta\lambda$  (от  $\lambda - \Delta\lambda/2$  до  $\lambda + \Delta\lambda/2$ ). Аналогичным образом *вводится понятие* спектральной лучепоглощательной способности.

Лучепоглощательная способность всех реальных тел меньше единицы. Так, например, для видимой части спектра лучепоглощательная способность алюминия равна 0,1, меди—0,5, воды—0,67.

Воображаемое тело, поглощающее при любой температуре всю падающую на него лучистую энергию, называется абсолютно черным телом\ лучепоглощательная способность такого тела для всех длин волн одинакова и равна единице.

Для видимой части спектра телом, близким по своим свойствам к абсолютно черному, является сажа ( $A = 0,95$ ).

Практически наиболее совершенным абсолютно черным телом является малое отверстие в стенке замкнутой полости, внутренняя поверхность которой зачернена (см. рис.). Луч, попавший в отверстие, многократно отражается стенками полости и практически не выходит обратно, поскольку при каждом отражении значительная часть его энергии поглощается стенками.

Абсолютно черное тело, поглощая падающую на него лучистую энергию, вместе с тем само излучает. Поэтому, при низкой температуре полости отверстие в ней кажется черным; если же полость нагрета до высокой температуры, то отверстие представляется ярко светящимся. Примерами практически абсолютно черных тел могут служить зрачок глаза и смотровое отверстие мартеновской печи.

Выясним, как связаны между собой лучеиспускательная и лучепоглощательная способности тела. Представим себе изолированную систему из двух тел, имеющих различную температуру и могущих обмениваться энергией только путем лучеиспускания и лучепоглощения. Через некоторое время в такой системе установится тепловое равновесие. Обозначим лучеиспускательные и лучепоглощательные способности тел при температуре лучистого равновесия соответственно через  $E'$ ,  $E''$  и  $A'$ ,  $A''$ . Предположим, что первое тело испускает с  $1 \text{ м}^2$  поверхности за  $1 \text{ с}$  в  $n$  раз больше энергии, чем второе, т. е.

$$E' = nE''.$$

Но тогда оно должно и поглощать в  $n$  раз больше энергии, чем второе тело, т. е. должно иметь место равенство

$$A' = nA'';$$



в противном случае первое тело начнет нагреваться (или охлаждаться) за счет второго тела и его температура будет изменяться.

Если изолированная система состоит из многих тел с лучеиспускательными способностями  $E'$ ,  $E''$ ,  $E'''$ , ... и лучепоглощательными способностями  $A'$ ,  $A''$ ,  $A'''$ , ... и одно из них является абсолютно черным, то аналогичные рассуждения приведут к следующему выводу:

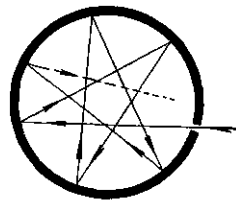
$$\frac{E'}{A'} = \frac{E''}{A''} = \frac{E'''}{A'''} = \dots = \varepsilon,$$

где  $E$  — лучеиспускательная способность абсолютно черного тела.

Соотношение (1) представляет собой закон Кирхгофа: *для всех тел при данной температуре отношение лучеиспускательной способности к лучепоглощательной способности есть постоянная величина, равная лучеиспускательной способности абсолютно черного тела при той же температуре.*

Этот закон остается справедливым и для спектральных лучеиспускательной и лучепоглощательной способностей тел:

$$\frac{E'_\lambda}{A'_\lambda} = \frac{E''_\lambda}{A''_\lambda} = \frac{E'''_\lambda}{A'''_\lambda} = \dots = \varepsilon_\lambda.$$



Из закона Кирхгофа вытекают три важных следствия, что

1. Лучеиспускательная способность любого тела при данной температуре равна произведению его лучепоглощательной

способности на лучеиспускательную способность абсолютно черного тела при той же температуре:

2. Лучеиспускательная способность любого тела меньше лучеиспускательной способности абсолютно черного тела при той же температуре.

3. Если тело не поглощает каких-либо волн, то оно и не испускает их.

Эти соотношения позволяют определять лучеиспускательную способность любого тела, если известна его лучепоглощательная способность и лучеиспускательная способность абсолютно черного тела.

Основным источником нагревания почвы является солнечное излучение. Изменяя лучепоглощательную способность поверхности почвы путем покрытия этой поверхности различными красителями, можно в значительных пределах регулировать температуру теплового равновесия верхнего слоя почвы. Этот прием, широко применяемый в агрономической практике, называют мульчированием. В качестве покрытий, носящих общее название мульчи, используют молотый мел, торфяной и угольный порошки, битум, нигрозин и т.п.

Очевидно, что для увеличения лучепоглощательной способности почвы (и, следовательно, для повышения температуры почвы) надо применять темную мульчу, а для уменьшения лучепоглощательной способности почвы (и понижения температуры почвы) — светлую мульчу.

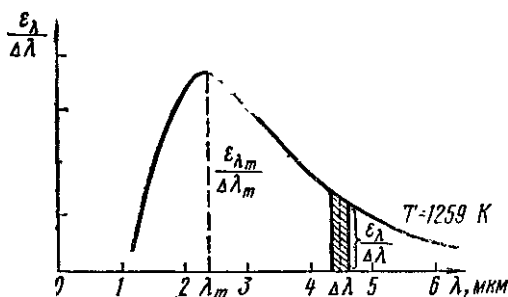
# Законы излучения абсолютно черного тела. Квантовый характер излучения.

Распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела было изучено экспериментально. В качестве абсолютно черного тела использовалась полость с малым отверстием, а также уголь.

На рис. представлен график распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела при температуре  $T = 1259$  К. По оси абсцисс отложены длины волн (в микрометрах); по оси ординат отложены (в условных единицах) отношения спектральной лучеиспускательной способности абсолютно черного тела к интервалу длины волн.

Таким образом, площадь, ограниченная кривой распределения и осью абсцисс, представляет собой полную лучеиспускательную способность абсолютно черного тела при температуре 1259 К, т. е. величину энергии, испускаемой с единицы площади его поверхности за 1 с

$$j \left( \sum \frac{\varepsilon_{\lambda}}{\Delta \lambda} \cdot \Delta \lambda = \sum \varepsilon_{\lambda} = \varepsilon \right).$$



Видно, что при данной температуре максимум излучения абсолютно черного тела приходится на длину волны 2,4 мкм (инфракрасное излучение).

Зависимость полной лучеиспускательной способности от температуры описывается законом Стефана — Больцмана: *полная лучеиспускательная способность абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры:*

$$E = \sigma T^4$$

где  $\sigma$  - постоянная Стефана — Больцмана,

$\sigma$

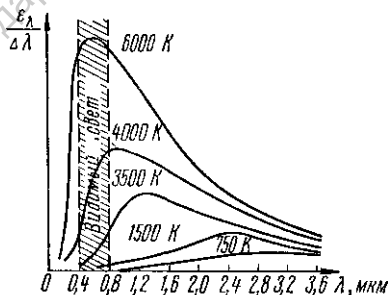
$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}.$$

Зависимость длины волны  $\lambda_m$  от температуры выражается законом Вина:

*длина волны, соответствующая максимуму излучения абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре:*

$$\lambda_m T = b,$$

где постоянная Вина  $b = 0,28979 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$ .



Для иллюстрации законов Стефана — Больцмана и Вина на рис. показано распределение энергии в спектре излучения

угля при различных температурах (спектр излучения угля близок к спектру излучения абсолютно черного тела). На рисунке видно, что с повышением температуры лучеиспускательная способность возрастает (площадь, заключенная между кривой распределения и осью абсцисс, увеличивается), а длина волны  $\lambda_{\text{ш}}$ , соответствующая максимуму излучения, уменьшается (максимум кривой распределения смещается влево).

Наглядным примером, подтверждающим уменьшение  $\lambda_{\text{т}}$  с ростом температуры тела, является изменение цвета свечения нагреваемого металла. Сначала металл остается темным ( $\lambda_{\text{т}}$  лежит в инфракрасной области); затем при достаточно высокой температуре появляется красное свечение металла («красное каление»), потом оранжевое, желтое и, наконец, голубовато-белое свечение («белое каление»).

Следует, конечно, иметь в виду, что металл не является абсолютно черным телом. Однако, согласно следствию, вытекающему из закона Кирхгофа, характер распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела сохраняется в общих чертах и для не-черных тел.

Из рис. видно, что при температуре  $T = 6000 \text{ К}$  максимум излучения приходится на видимый свет (0,5 мкм). Отсюда следует, что наиболее выгодный в световом отношении тепловой источник света должен иметь температуру около 6000 К. Однако, и у такого источника световой коэффициент полезного действия (т. е. отношение энергии излучения, приходящейся на видимую часть спектра, ко всей энергии излучения) оказывается малым — порядка 15%, поскольку, как это видно из рис., значительная доля энергии излучения приходится на инфракрасные лучи. У современных осветительных электроламп температура нити накала равна

приблизительно 3000 К, что соответствует величине светового коэффициента полезного действия порядка 3%. Таким образом, электролампа в большей мере греет, чем светит.

На законе Вина основана оптическая пирометрия — метод определения температуры раскаленных тел (металла — в плавильной печи, газа — в облаке атомного взрыва, поверхности звезд и т. п.) по спектру их излучения. Именно этим методом была впервые определена температура поверхности Солнца. Максимум энергии солнечного излучения приходится на видимый свет длиной волны  $\lambda_m = 0,47$  мкм. Следовательно, согласно закону Вина, абсолютная температура поверхности Солнца

$$T = \frac{b}{\lambda_m} = \frac{0,2898}{0,47 \cdot 10^{-4}} \text{ К} \approx 6160 \text{ К}.$$

Таким образом, верхняя кривая распределения (см. рис.) приблизительно соответствует распределению энергии в спектре солнечного излучения.

Для нашей планеты Солнце является основным и чрезвычайно мощным источником лучистой энергии. На верхней границе земной атмосферы интенсивность солнечного излучения составляет около  $8,4 \times 10^4$  Дж/(м<sup>2</sup> • мин); эта величина называется солнечной постоянной. На земной поверхности интенсивность солнечного излучения в среднем на 25% меньше (вследствие поглощения в атмосфере).

Законы Стефана—Больцмана и Вина являются частными законами излучения абсолютно черного тела: они не дают общей картины распределения энергии по длинам волн при различных температурах. Был предпринят ряд попыток теоретически установить закон распределения

энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, т. е. получить формулу, выражающую спектральную лучеиспускающую способность этого тела как функцию длины волны и абсолютной температуры  $T$ :

$$\varepsilon_{\lambda} = f(\lambda, T).$$

Однако, эти попытки приводили к результатам, противоречащим опыту. Лишь затем нашли вид функции. Для этого пришлось отказаться от установившегося в физике представления об электромагнитном излучении как о непрерывной электромагнитной волне, могущей иметь любую частоту и в соответствии с этим переносить любые количества энергии. Высказывалась гипотеза, согласно которой электромагнитная энергия может излучаться и распространяться только вполне определенными (для данной излучающей системы) отдельными порциями или квантами. Таким образом, можно сказать (пользуясь понятиями классической физики), что электромагнитные волны переносят энергию только в количествах, кратных величине кванта энергии; количество переносимой энергии может быть равным, но не может быть равным дробному числу квантов, например  $3\varepsilon/4$ .

Величина кванта энергии пропорциональна частоте излучения (обратно пропорциональна длине волны):

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,625 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{5,55 \cdot 10^{-7}} \text{ Дж} = 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda},$$

где  $h$  - постоянная Планка. По формуле можно вычислить величину кванта энергии для излучения любой длины волны.

В таблице приведены значения квантов энергии для некоторых длин волн, соответствующих различным видам электромагнитного излучения.

Вид излучения	Длина волны	Частота (Гц)	Величина кванта (Дж)
Радиоволны . . . . .	$10^3$ м = 1 км $10^0$ м = 1 м	$3 \cdot 10^8$ $3 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^{-28}$ $2 \cdot 10^{-28}$
Видимый свет . . . . .	$5,6 \cdot 10^{-7}$ м = 0,56 мкм	$5,4 \cdot 10^{14}$	$3,6 \cdot 10^{-19}$
Рентгеновские лучи . . . . .	$10^{-9}$ м = 1 нм	$3 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{-16}$
Гамма-излучение . . . . .	$10^{-12}$ м = 1 пм	$3 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{-13}$

Из таблицы видно, что при больших длинах волн величина кванта крайне мала. Поэтому, в общем потоке энергии, исходящем от длинноволнового излучателя (например, макроскопического генератора радиоволн), отдельный квант энергии совершенно незаметен, в связи с чем прерывистость излучения энергии не обнаруживается.

В коротковолновом излучении величина кванта энергии сравнительно большая. Благодаря этому в потоке энергии, исходящем от коротковолновых микроизлучателей (атомов и молекул), отдельные кванты энергии становятся заметными, обнаруживая тем самым прерывистость (квантовый характер) излучения.

Процесс поглощения электромагнитной энергии веществами также носит прерывистый (квантовый) характер.

Таким образом, между процессами, совершающимися в макро- и микро-мире, существует не только количественное, но и качественное различие. Поэтому, законы классической физики, полученные из наблюдений над макрообъектами, не



могут или, точнее говоря, не всегда могут быть пригодны для описания процессов, совершающихся в микрообъектах. Именно этим была обусловлена бесплодность попыток теоретически вывести закон распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, исходя из понятий классической физики.

На основе представлений о квантовом характере теплового излучения получено следующее выражение спектральной лучеиспускательной способности абсолютного черного тела:

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1},$$

Формула находится в полном соответствии с опытными данными. Из этой формулы получаются как следствия законы Стефана — Больцмана и Вина.

На основе этой теории создана квантовая (фотонная) теория света и квантовая теория строения атома.

Отметим, что квантование энергии свойственно не только электромагнитному излучению, но и многим другим физическим процессам. Так, например, квантованием энергии колебательных и вращательных движений атомов и молекул объясняется зависимость теплоемкости многоатомных газов от температуры, наблюдаемая при высоких температурах.

Квантовые свойства света обусловлены особенностями структуры микроскопических излучателей света — атомов и молекул. В связи с этим дальнейшему ознакомлению с квантовыми свойствами света целесообразно предпослать основные сведения о строении атома.

## **Строение-атома (ядерная модель). Дискретность энергетических состояний атома.**

Было с полной достоверностью установлено, что в состав каждого атома входят электроны. Вместе с тем было известно, что атом в целом электронейтрален. Отсюда следовало, что отрицательный заряд электронов должен компенсироваться положительным зарядом каких-то других частиц, также входящих в состав атома.

Была предложена ядерная (планетарная) модель строения атома. Согласно этой модели, весь положительный заряд и почти вся масса ( $>>99,94\%$ ) атома сосредоточены в атомном ядре, размер которого ничтожно мал (порядка  $10^{-13}$  см) по сравнению с размером атома ( $10^{-8}$  см). Вокруг ядра по замкнутым (эллиптическим) орбитам движутся электроны, образуя электронную оболочку атома. Заряд ядра равен по абсолютной величине суммарному заряду электронов.

Таким образом, атом в целом является микрообразованием: совокупностью небольшого числа очень малых частиц вещества (ядра и электронов), распределенных в сравнительно очень большом объеме.

Предположение о вращении электронов вокруг ядра сделано в связи с тем, что, согласно теореме Ирншоу, атом в виде статической системы не может быть устойчивым.

Что касается предположения о наличии в центре атома одного массивного, но весьма малого ядра, доказано это экспериментально на опытах с рассеянием альфа-частиц, проходящих через вещество. Альфа-частицы, испускаемые радиоактивными элементами, движутся со скоростью порядка  $10^4$  км/с, имеют положительный заряд, равный двум

элементарным зарядам, и массу, в 7350 раз большую массы электрона.

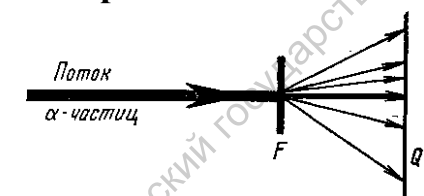
Схема опытов показана на рис. -  $\alpha$ -частицы, испускаемые радиоактивным веществом, двигались в вакууме и, проходя через фольгу F (толщиной около 1 мкм), падали на люминесцирующий экран Q. Удар каждой  $\alpha$ -частицы об экран вызывал кратковременную вспышку —сцинтилляцию, наблюдаемую в микроскоп.

Наблюдения показали, что большинство  $\alpha$ -частиц проходит сквозь фольгу без заметного отклонения от первоначального направления, некоторые частицы отклоняются на небольшой угол и лишь немногие частицы претерпевают сильное отклонение.

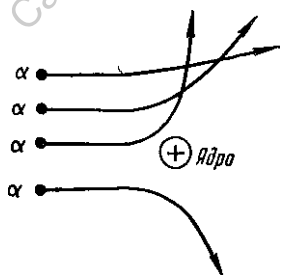
Естественно предположить, что отклонение  $\alpha$ -частиц вызвано их взаимодействием («столкновением») с массивными атомными ядрами, поскольку легкие электроны не могут существенно изменить движение сравнительно тяжелых и очень быстрых  $\alpha$ - частиц.

Из того факта, что значительное отклонение испытывают только немногие  $\alpha$ -частицы, следует, что лишь некоторые из них проходят вблизи ядер; а это в свою очередь означает, что

атомные ядра имеют малый размер и расположены в веществе фольги на очень больших расстояниях друг от друга.



Полагая, что ядро и  $\alpha$ -частица взаимодействуют (отталкиваются) по закону Кулона, теоретически рассчитана картина рассеяния  $\alpha$ -частиц, получив результат, хорошо согласующийся с опытными данными.



Исследования позволили определить порядок размера ядра ( $10^{-13}$  см), его заряд.

При этом оказалось, что заряд  $q$  ядра, выраженный в элементарных зарядах  $e$ , равен порядковому номеру  $Z$  химического элемента в периодической системе:

$$q = eZ$$

и вместе с тем равен числу электронов в электронной оболочке атома.

Однако это не укладывалось в рамки законов классической физики. В самом деле, согласно законам классической электродинамики, электрон, вращаясь вокруг ядра (т. е. двигаясь с ускорением), должен непрерывно излучать электромагнитные волны, частота которых равна частоте вращения электрона. Так как это излучение сопровождается непрерывной потерей энергии, то электрон должен постепенно приближаться к ядру, двигаясь по спирали, и в конце концов упасть на ядро. По мере приближения электрона к ядру частота вращения электрона, и частота электромагнитного излучения должны непрерывно изменяться. Следовательно, атом должен давать сплошной спектр излучения.

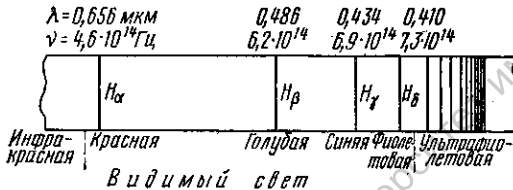
Таким образом, с точки зрения классической физики атом оказывается неустойчивой системой, дающей сплошной спектр излучения. Между тем и то и другое противоречит опыту. В действительности атомы представляют собой весьма устойчивые образования, характеризующиеся линейчатым спектром излучения.

Тщательные исследования спектров излучения различных разреженных газов (т. е. спектров излучения атомов) показали, что каждому газу присущ вполне определенный линейчатый спектр. Более того, обнаружилось, что спектральные линии можно

распределить по группам (сериям); линии, принадлежащие к одной серии, связаны между собой определенной закономерностью. Так, например, в видимой части спектра излучения водорода обнаружили линии частота которых выражается эмпирической формулой

$$\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где  $n = 3, 4, 5$ ,  $R$  — постоянная Ридберга.



Серия схематически представлена на рис. Над спектральными линиями проставлены соответствующие им значения длин волн и частот  $\nu$ , вычисленные по формуле. Первая слева линия  $H_\alpha$  имеет ярко-красный цвет; ей соответствует  $n = 3$ . Линия  $H_\beta$  — голубая ( $n = 4$ ), линия  $H_\gamma$  — синяя ( $n = 5$ ). Остальные линии этой серии лежат в ультрафиолетовой части спектра.

Отсюда создалась теория строения атома. В ее основу положены три постулата:

1. Электроны могут двигаться в атоме не по любым орбитам, а только по орбитам вполне определенного радиуса.

На этих орбитах, называемых стационарными, или устойчивыми, момент количества движения электрона кратен величине  $h/2\pi$ :

$$mvr = n \frac{h}{2\pi},$$

где  $m$  — масса электрона,  $v$  — его скорость;  $r$  — радиус орбиты;  $n$  — целое число, называемое квантовым ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ),  $h$  — постоянная Планка. Очевидно, что формула (1) является условием квантования радиуса орбит.

2. Движение электронов по стационарным орбитам не сопровождается излучением (поглощением) энергии.

3. Переход электрона с одной стационарной орбиты на другую сопровождается излучением (или поглощением) кванта энергии.

Величина этого кванта равна разности энергии стационарных состояний атома до и после излучения (поглощения):

$$h\nu = W_1 - W_2.$$

Соотношение называется условием частот.

Таким образом, частота электромагнитных волн, излучаемых атомом, определяется не частотой вращения электронов в атоме, а разностью энергии стационарных состояний атома.

Постулаты, сохранив в основном модель атома, вместе с тем освободили ее от упомянутых ранее двух недостатков (противоречий опыту).

Постулатам придается более общая формулировка: атом устойчив только в состояниях, соответствующих определенным значениям энергии ( $W_1, W_2, W_3, \dots$ ); переход атома из одного устойчивого состояния в другое сопровождается излучением или поглощением кванта энергии, величина которого определяется условием частот.

# Квантовая теория строения атома водорода. Объяснение спектров излучения и поглощения водорода

В атоме водорода вокруг ядра, несущего один элементарный заряд  $e$ , движется один электрон. Ядро можно считать неподвижным, поскольку его масса в 1840 раз больше массы электрона; орбиты электрона можно (в первом приближении) полагать круговыми.

Очевидно, что центростремительной силой, удерживающей электрон на орбите радиусом  $r$ , является кулоновская сила притяжения между электроном и ядром:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2},$$

где квантовое число  $n = 1, 2, 3, \dots$ . По формуле можно рассчитать радиус любой стационарной орбиты. Например, радиус

$$r = n^2 \frac{(6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с})^2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}}{3,14 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}} \approx 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 53 \text{ пм}.$$

Следовательно, радиусы стационарных орбит относятся между собой как квадраты чисел натурального ряда.

Орбиты водородного атома изображены на рис.; в пикометрах значения радиуса орбит равны:  $r_1 = 53$ ,  $r_2 = 212$ ,  $r_3 = 477$ ,  $r_4 = 848$ ;  $r_5 = 1325$  (орбиты большого радиуса вычерчены неполностью).

Определим полную энергию  $W$  электрона в атоме. Она складывается из кинетической энергии  $W_k$  поступательного движения электрона по орбите и потенциальной энергии  $W_n$  притяжения электрона к ядру.

Учитывая это, получим

$$W_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

Согласно расчету потенциальной энергии системы двух разноименных зарядов. Поэтому,

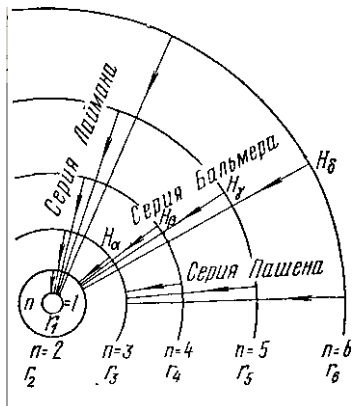
$$W_n = - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$W = W_k + W_n = - \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

Что касается потенциальной энергии электрона, то она отрицательна. Т.е. полная энергия электрона оказывается отрицательной и равной по абсолютной величине его кинетической энергии.

$$W = - \frac{1}{n^2} \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2}$$

По этой формуле можно рассчитать энергию электрона для любой стационарной орбиты. Так для ближайшей к ядру орбиты ( $n = 1$ ) получим





$$W = - \frac{1}{1^2} \cdot \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^4}{8 \cdot (6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с})^2 (8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м})^2} \approx$$

$$\approx - 21,68 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = - 13,55 \text{ эВ.}$$

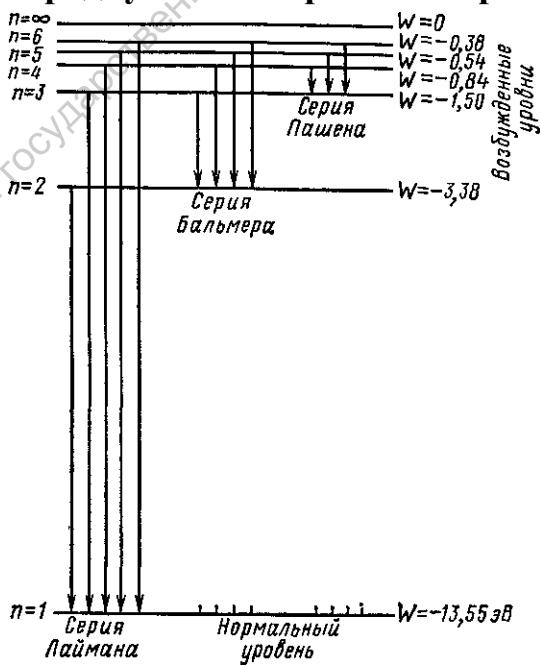
Величина полной энергии электрона, находящегося на стационарной орбите, называется уровнем энергии атома (или энергетическим уровнем). На рис. схематически изображены уровни энергии водородного атома, рассчитанные; здесь же указаны соответствующие им значения

$$(1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}).$$

энергии в электрон-вольтах

+ Кинетическую энергию вращения электрона вокруг собственной оси не принимаем во внимание поскольку она одинакова для всех стационарных орбит

Согласно формуле - энергия атома возрастает с увеличением квантового числа  $n$ , или, что то же, с увеличением радиуса электронной орбиты. Здесь надо



учитывать, что энергия  $W$  отрицательна; поэтому уменьшение ее абсолютной величины соответствует возрастанию энергии. Минимумом энергии ( $W = -13,55$  эВ) атом обладает при движении электрона по ближайшей к ядру орбите ( $n = 1$ ), а максимумом энергии ( $W = 0$ ) — при движении электрона по самой дальней орбите.

При переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую (ближнюю к ядру) орбиту излучается квант энергии, равный разности энергетических уровней атома до излучения и после него. Так, например, переход электрона со второй орбиты ( $n = 2$ ) на первую ( $n = 1$ ) сопровождается излучением кванта  $h\nu_{2\rightarrow 1} = -3,38 - (-13,55) = +10,17$  эВ, а переход электрона с третьей орбиты ( $n = 3$ ) на вторую ( $n = 2$ ) сопровождается излучением кванта  $h\nu_{3\rightarrow 2} = -1,50 - (-3,38) = 1,88$  эВ. Этим излучениям соответствуют значения частот (длин волн):

$$\nu_{2\rightarrow 1} = \frac{10,17 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,625 \cdot 10^{-34}} \approx 2,46 \cdot 10^{15} \text{ (Гц)} \quad (\lambda_{2\rightarrow 1} \approx 0,122 \text{ мкм}).$$

$$\nu_{3\rightarrow 2} = \frac{1,88 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,624 \cdot 10^{-34}} \approx 4,55 \cdot 10^{14} \text{ (Гц)} \quad (\lambda_{3\rightarrow 2} \approx 0,659 \text{ мкм}).$$

Самопроизвольный переход электрона на более далекую орбиту т. е. самопроизвольный переход атома на более высокий энергетический уровень невозможен. Для осуществления такого перехода необходимо сообщить атому определенное количество энергии извне, т. е. возбудить атом. Так, например, переход электрона с первой стационарной орбиты на вторую совершается при поглощении атомом кванта, равного 10,17

эВ, а переход электрона со второй орбиты на третью — поглощением кванта, равного 1,88 эВ.

Таким образом, атом может излучать и поглощать волны только вполне определенных частот (длин), чем и обусловлен линейчатый характер водородного спектра.

Нормальным состоянием атома является такое, при котором электрон движется по самой близкой к ядру орбите ( $n \sim 1$ ). В этом случае атом не может излучать, поскольку электрон не имеет возможности перейти с этой орбиты еще ближе к ядру. Энергетический уровень  $W = -13,55$  эВ, соответствующий нормальному состоянию атома, называется нормальным уровнем; все остальные уровни называются возбужденными.

Выведем общую формулу частоты  $\nu$  излучения атома. Для этого подставим выражение энергии в условие частот :

$$\nu = \frac{W - W_0}{h} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3} \left[ -\frac{1}{n^2} - \left( -\frac{1}{n_0^2} \right) \right] = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h} \left( \frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где  $n$  и  $W$  — квантовое число и энергия, соответствующие начальному состоянию атома (до излучения), а  $n_0$  и  $W_0$  — характеристики конечного состояния атома (после излучения). Величина постоянного множителя, стоящего в правой части формулы, оказывается равной постоянной Ридберга;

$$\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3} = R,$$

в чем легко убедиться, подставляя численные значения универсальных постоянных. Тогда

$$\nu = R \left( \frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n^2} \right)^*$$

Сопоставление с эмпирическими сериальными формулами показывает, что они являются частными случаями.

Следовательно, спектральные линии серии Лаймана соответствуют излучению атома водорода при переходе электрона со второй, третьей, четвертой и т. д. орбит на первую; линии серии Бальмера соответствуют излучению при переходе электрона с третьей, четвертой, пятой и т. д. орбит на вторую; линии серии Пашена соответствуют излучению при переходе электрона в четвертой, пятой, шестой и т. д. орбит на третью.

Так как газ состоит из множества различно возбужденных атомов, то в нем одновременно совершаются все возможные типы переходов электрона. Поэтому, в спектре излучения водорода одновременно представлены линии всех серий (при том условии, что атомы все время возбуждаются посредством какого-либо внешнего источника энергии).

Образование спектральных серий Лаймана, Бальмера и Пашена схематически показано на рис.

Отметим, что в каждой серии расстояние между спектральными линиями постепенно уменьшается в сторону коротких волн и в конце концов линии практически сливаются. Таким образом, каждая серия оказывается ограниченной со стороны коротких волн. Эта граница называется головой серии, ее частота определяется при  $n = \infty$  что соответствует падению свободного электрона на одну из стационарных орбит водородного иона.

Рассмотренная теория строения атома водорода применима и к водородоподобным атомам, т. е. к ионизированным атомам, содержащим только один

электрон (например, к ионам  $\text{He}^+$ ,  $\text{Li}^{++}$ ,  $\text{Be}^{+++}$ ) Однако, в этом случае при выводе формул следует полагать заряд ядра равным не  $e$ , а  $eZ$  ( $Z$  — атомный номер элемента).

Применительно к водородоподобным атомам спектральная формула примет вид

$$\nu = RZ^2 \left( \frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Квантовая теория сыграла важную роль в развитии физики. Количественно объяснив строение атома водорода и сложную структуру водородного спектра, она наметила правильный подход к изучению внутриатомных процессов. Правда, непосредственное использование теории для расчета спектров многоэлектронных атомов оказалось невозможным. Понадобилось дальнейшее развитие этой теории, завершившееся созданием квантовой механики, количественно объясняющей все особенности строения и свойств атомов и молекул.

Ограниченность квантовой теории обусловлена тем, что она не вполне последовательна в своих построениях: базируясь на квантовых исходных положениях (постулатах), она пользуется законами классической механики для описания движения электронов в атоме (в этом смысле ее можно было бы назвать «полуквантовой» теорией).

Между тем электрон в атоме уже не является обычной (классической) частицей, в чем легко убедиться, применив к этому электрону принцип Гейзенберга. Так как скорость электрона в атоме имеет порядок  $10^6$  м/с, то неточность в ее определении по крайней мере не должна превышать величины самой скорости, т. е. максимально допустимая

неточность  $\Delta v = 10^6$  м/с. Тогда, согласно соотношению неопределенностей, неточность в определении координаты

$$\Delta x = \frac{h}{2\pi m \cdot \Delta v} = \frac{6,625 \cdot 10^{-34}}{2 \cdot 3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^6} \approx 10^{-10} \text{ (м)} = 10^{-8} \text{ см.}$$

Но  $10^{-8}$  см - размер самого атома. Следовательно, понятие местоположения электрона в атоме теряет смысл. Лишаются содержания и такие классические понятия, как траектория электрона в атоме и перемещение при его переходе с одной орбиты на другую (т. е. из одного энергетического состояния в другое). Итак, действительно, атомный электрон не является обычной частицей (в классическом смысле).

В связи с этим современная квантовая механика не устанавливает точного положения электронов в объеме атома, а рассматривает лишь вероятность нахождения электрона в том или ином месте объема. Это значит, что с точки зрения квантовой механики заряд электрона не сосредоточен в том месте, где в данный момент находится электрон, а распределен («размазан») по всему объему атома, образуя электронное облако переменной плотности. Плотность электронного облака в любой точке объема атома пропорциональна вероятности нахождения электрона в этой точке.

В квантовой механике состояние движения электронов в атоме характеризуется не одним, а четырьмя квантовыми числами (главным, побочным, магнитным и спиновым).

Главное квантовое число  $n$  принимает только целочисленные значения.

Побочное (или орбитальное) квантовое число  $l$  принимает целочисленные значения от 0 до  $p-1$  (всего  $p$  значений).

Магнитное квантовое число  $m_l$  принимает целочисленные значения от  $-l$  до  $+l$ , включая 0 (всего  $2l + 1$  значений).

Спиновое квантовое число  $m_s$  может иметь только два полуцелых значения  $+1/2$  и  $-1/2$ .

Совокупность электронов, характеризующихся одним и тем же значением главного квантового числа ( $n$ ), образует электронный слой, или энергетический уровень атома. Совокупность электронов с одним и тем же значением побочного квантового числа образует подгруппу или энергетический подуровень. Электроны данного подуровня несколько различаются между собой величиной энергии, обладая различными значениями магнитного или спинового квантовых чисел. Таким образом, квантовые числа определяют возможные значения энергий электронов в атоме, т. е. возможные энергетические состояния атома.

Распределение электронов в атоме по энергетическим уровням и подуровням (т. е. по значениям квантовых чисел) осуществляется на основе двух принципов:

- 1) принципа Паули, согласно которому в атоме не может быть электронов, характеризующихся одинаковой комбинацией значений квантовых чисел, иначе говоря, в атоме состояния всех электронов различны;
- 2) принципа минимума энергии: распределение электронов в атоме соответствует минимуму энергии атома

Учитывая принцип Паули, можно найти максимальное число электронов в любом электронном слое атома. Так как  $m_l$  имеет  $(2l + 1)$  значений, а величина  $m_s$  принимает два значения, то число электронов с данными  $n$  и  $l$  равно  $2(2l + 1)$ . При данном  $n$  величина  $l$  принимает  $n$  значений от 0 до  $(n - 1)$ . Поэтому, максимальное число электронов,

характеризующееся данным значением  $n$ , т. е. максимально возможное число электронов в данном слое, равно (в соответствии с формулой суммы членов арифметической прогрессии)

$$\sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2 \cdot \frac{1 + [2(n-1) + 1]}{2} \cdot n = 2n^2.$$

Устанавливаемые квантовой механикой закономерности внутриатомных процессов с исключительной точностью подтверждаются опытными данными, однако она уже не обладает той наглядностью и простотой.

## Понятие о строении многоэлектронных атомов и образовании оптических и рентгеновских (характеристических) спектров

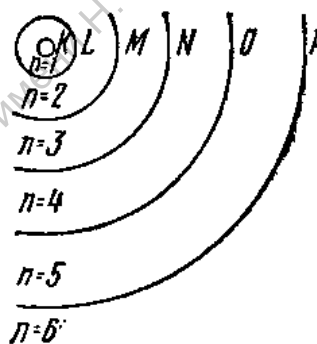
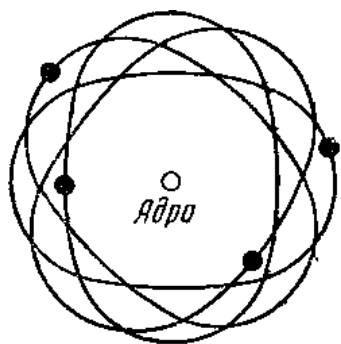
Теоретические и экспериментальные исследования, в частности изучение атомных спектров, показали, что подобно атому водорода, многоэлектронные атомы обладают дискретными энергетическими уровнями. Дискретность уровней обусловлена главным образом наличием в атоме ряда электронных слоев с определенными значениями радиуса. Каждый электронный слой можно схематически представить как совокупность стационарных эллиптических орбит. Причем орбиты принадлежащие одному электронному слою, в некоторой (небольшой) мере различаются между собой либо эксцентриситетом, либо ориентацией в пространстве. Поэтому, даже электроны, которые находятся в одном электронном слое, отличаются друг от друга своим состоянием: они движутся по различным стационарным орбитам. По одной же орбите



может двигаться не более двух электронов, которые в этом случае различаются направлением собственного момента количества движения (спина). Таким образом,

*в одном атоме не может быть двух или нескольких электронов с тождественным состоянием движения (принцип Паули).*

На рис. дана примерная схема одного электронного слоя; точками изображены электроны, движущиеся по четырем стационарным орбитам, образующим этот слой.



Электронные слои принято обозначать (начиная с ближайшего к ядру слоя) буквами К, L, M, N, O и т. д. (в порядке латинского алфавита). На рис. представлена схема электронных слоев атома (без соблюдения их относительного расстояния от ядра).

Наибольшее количество электронов, которое может находиться в одном слое, определяется квантовым соотношением:

$$m = 2n^2,$$

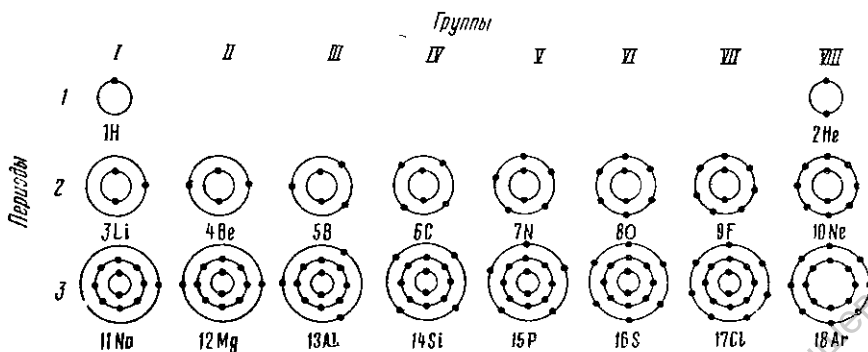
где  $n$  — главное квантовое число, являющееся вместе с тем номером слоя ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ). Таким образом, в К может находиться максимум 2 электрона, в L-слое ( $n = 2$ ) — 8 электронов, M-слое ( $n = 3$ ) — 18 электронов и т. д. Общее число электронов в атоме равно заряду ядра, выраженному в элементарных зарядах.

У невозбужденного атома электроны заполняют ближайшие к ядру слои, что соответствует минимуму энергии атома.

На рис. схематически изображены атомы химических элементов, составляющих первые три периода. Электроны показаны точками; относительные расстояния между электронными слоями не соблюдены.

Вообще говоря, диаметр слоев у различных атомов различен. По мере увеличения заряда ядра диаметр внутренних слоев уменьшается (они как бы «подтягиваются» к ядру). Что касается наружного слоя, то благодаря экранирующему действию внутренних слоев его диаметр изменяется незначительно. Поэтому, размеры различных атомов оказываются приблизительно одинаковыми (порядка  $10^{-8}$  см).

Следует подчеркнуть, что приведенная схема является весьма грубой; мы пользуемся ею в целях наглядности.



Начиная с четвертого периода порядок заполнения слоев усложняется. На некоторых участках системы новый слой начинает заполняться раньше, чем завершилось заполнение предыдущего слоя; на других участках, наоборот, происходит заполнение незаконченных внутренних слоев, а число электронов в наружном слое остается неизменным.

Эти «аномалии» в порядке заполнения слоев имеют место у атомов с большим количеством электронов. Они обусловлены взаимодействием электронов, делающим такие аномалии энергетически более «выгодными», т. е. соответствующими минимуму энергии атома.

Нетрудно заметить, что *общее число электронов в атоме химического элемента (а следовательно, и заряд ядра) равно порядковому {атомному} номеру элемента в системе, число электронных слоев равно номеру периода, к которому относится элемент, а число электронов во внешнем слое равно номеру группы, занимаемой элементом в этой системе.*

Известно, что все элементы, относящиеся к одной группе системы (например, H, Li, Na, K, Rb, Cs), обладают сходными химическими свойствами. Вместе с тем атомы всех этих элементов имеют во внешнем слое одинаковое число электронов, называемых валентными. Следовательно, периодичность химических свойств атомов, вызвана

**особенностью строения атомов: периодическим повторением числа валентных электронов.**

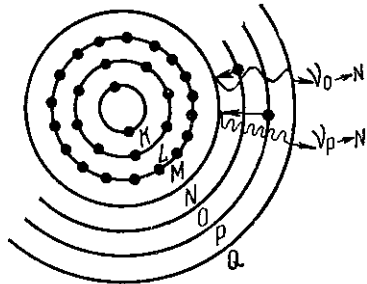
**Активная роль валентных электронов при химических реакциях обусловлена следующей причиной. Валентные электроны сравнительно слабо связаны с ядром, так как они наиболее удалены от него и, кроме того, экранированы внутренними электронными слоями. Энергия, поглощаемая или выделяемая при химических реакциях, не превышает нескольких электронвольт. Такое количество энергии оказывается достаточным только для перемещения (перераспределения) валентных электронов; для перемещения внутренних электронов (связанных с ядром значительно сильнее) оно является слишком малым.**

**Как и у атома водорода, возникновение спектров излучения многоэлектронных атомов обусловлено переходами электронов из одного электронного слоя в другой, расположенный ближе к ядру. Само собой разумеется, что предварительно атом должен быть возбужден.**

**Если энергия возбуждения невелика (порядка 10 эВ), то возбуждаются только внешние энергетические уровни атома, т. е. имеют место только переходы внешних электронов (из валентного и соседнего с ним слоя) в более далекие электронные слои (не заполненные электронами). Через малый промежуток времени (порядка  $10^{-8}$  с) эти электроны возвращаются в исходные слои. При этом испускаются небольшие кванты энергии, частоты которых соответствуют оптическому спектру (спектру видимого света и части инфракрасного и ультрафиолетового излучения).**

**На рис. схематически показан процесс оптического излучения возбужденного атома, у которого слои К, L и M целиком заполнены, а два валентных электрона переведены**

В



следующие слои. При обратном переходе этих электронов в N-слой излучаются кванты, частоты. излучения изображены волнистыми линиями.

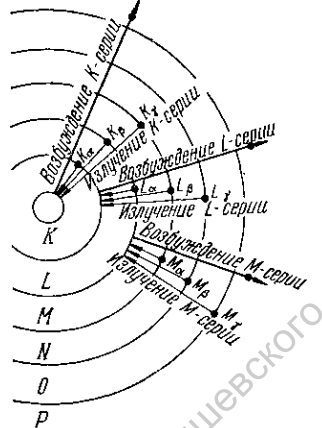
Атомы, относящиеся к одной группе периодической системы, имеют сходные оптические спектры, что подтверждает основную роль валентных электронов в образовании оптического спектра.

Оптический спектр молекулы резко отличается от спектров атомов, входящих в данную молекулу. Это объясняется тем, что при образовании молекулы изменяются («обобществляются») валентные слои атомов, т.е. именно те слои, которые ответственны за возникновение оптических спектров.

Для того чтобы вызвать перемещение электронов, находящихся во внутренних слоях атома, необходима большая энергия возбуждения, порядка  $10^4$ — $10^5$  эВ. Это обусловлено, во-первых, сильной связью внутренних электронов с ядром и, во-вторых, тем, что внутренние слои целиком заполнены (поэтому, внутренние электроны можно перевести только на периферию атома). Через малый промежуток времени — порядка  $10^{-8}$  с — на «вакантное место», освободившееся во внутреннем электронном слое, перейдет электрон из соседнего внутреннего слоя или с периферии атома. Этот процесс сопровождается испусканием большого кванта энергии; его частота соответствует характеристическому (рентгеновскому) излучению.

Возникновение некоторых серий характеристического излучения схематически показано на рис. Самой жесткой (высокочастотной) является K-серия. Она возникает при

электронных переходах L-K (линия  $K_{\alpha}$ ) у M-K (линия  $K_{\beta}$ ), N-K (линия  $K_{\gamma}$ ) и т. д., которым соответствуют частоты:



$$\nu_{L \rightarrow K} = \frac{W_L - W_K}{h}, \quad \nu_{M \rightarrow K} = \frac{W_M - W_K}{h}, \quad \nu_{N \rightarrow K} = \frac{W_N - W_K}{h}$$

и т. д. (где  $h$  — постоянная Планка, а  $W_K$ ,  $W_L$  и  $W_M$  и  $W_N$  — значения энергии электрона в слоях K, L, M и N). В пределах этой серии наиболее мягкой (имеющей наименьшую частоту) является линия  $K_{\alpha}$  а наиболее жесткой — линия, соответствующая непосредственному, переходу свободного электрона в K-слой (не показана на рисунке).

Наряду с K-серией возникают и более мягкие рентгеновские серии: L-серия, M-серия и т. д. Жесткость рентгеновского излучения возрастает по мере увеличения заряда атомного ядра, т. е. по мере увеличения атомного номера элемента.

Установил, что

*корень квадратный из частоты  $\nu$ , соответствующей данной линии характеристического рентгеновского излучения, является линейной функцией атомного номера  $Z$  элемента:*

$$\sqrt{\nu} = aZ - b,$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные величины. Это соотношение называется законом Мозли.

**Объединение атомов в молекулу не затрагивает внутренних электронных слоев атома, ответственных за возникновение рентгеновского спектра. Поэтому, характеристический спектр молекулы предстает собой совокупность характеристических спектров атомов, образующих данную молекулу.**

Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

## **Люминесценция. Законы фотолюминесценции и некоторые ее практические применения**

**Свечение вещества (т. е. испускание видимого света), обусловленное переходами атомов и молекул вещества с высших энергетических уровней на низшие, называется люминесценцией, или холодным свечением. Люминесценции должно предшествовать возбуждение атомов и молекул вещества. После устранения возбудителя люминесценция продолжается в течение некоторого промежутка времени, зависящего от природы люминесцирующего вещества и изменяющегося в широких пределах: от миллиардных долей секунды до многих часов и даже суток. По продолжительности «послесвечения» люминесценция подразделяется на флуоресценцию (кратковременное «послесвечение») и фосфоресценцию (длительное «послесвечение»). Впрочем, это подразделение весьма условно.**

**Свечение, обусловленное тепловым движением атомов и молекул (т. е. тепловое излучение), не относится к люминесценции. К ней не относятся также отражение и рассеяние света и некоторые другие виды свечения тела, прекращающиеся одновременно с устранением причины, вызвавшей их.**

**Чтобы отличить люминесценцию от этих видов свечения, ей можно дать следующее определение: люминесценция есть свечение вещества, являющееся избытком над тепловым излучением этого вещества при данной температуре и имеющее конечную длительность (т. е. не прекращающееся одновременно с устранением вызвавшей его причины).**

**Вещества, обладающие ярко выраженной способностью люминесцировать, называются люминофорами.**



**В зависимости от способа возбуждения люминесценции различают несколько ее видов.**

**1. Фотолюминесценция возбуждается видимым и ультрафиолетовым излучением. Примером фотолюминесценции может служить свечение часового циферблата и стрелок, окрашенных соответствующим люминофором.**

**2. Рентгенолюминесценция возбуждается рентгеновскими лучами; ее можно наблюдать, например, на экране рентгеновского аппарата.**

**3. Радиолюминесценция возбуждается радиоактивным излучением; наблюдается, например, на экране сцинтилляционных счетчиков.**

**4. Катодолюминесценция возбуждается электронным лучом; наблюдается на экранах осциллографа, телевизора, радиолокатора и других электроннолучевых приборов. В качестве люминофора, покрывающего экран, используются главным образом сульфиды и селениды цинка и кадмия.**

**5. Электролюминесценция возбуждается электрическим полем; имеет место, например, в газоразрядных трубках.**

**6. Хемилюминесценция возбуждается химическими процессами в веществе. Таковы, например, свечение белого фосфора, гниющей древесины, а также свечения некоторых споровых растений, насекомых, морских животных и бактерий.**

**Таким образом, люминесценция является своеобразным генератором (квантовым генератором), непосредственно преобразующим энергию электромагнитных волн различной длины, а также механическую, электрическую и химическую энергию в энергию видимого света.**

**Спектр люминесценции зависит от природы люминесцирующего вещества и вида люминесценции.**

**Из всех перечисленных видов люминесценции рассмотрим подробнее только фотолюминесценцию, имеющую большое практическое применение.**

**Экспериментальное изучение спектров фотолюминесценции показало, что они, как правило, отличаются от спектров возбуждающего излучения.**

*Спектр люминесценции и его максимум сдвинуты в сторону более длинных волн относительно спектра, использованного для возбуждения.*

**Эту закономерность, называемую правилом Стокса, легко объяснить на основе квантовой теории. Энергия поглощаемого кванта частично переходит в другие виды энергии, например в теплоту. Поэтому, энергия кванта люминесценции должна быть меньше.**

**Иногда может иметь место так называемая антистоксовская люминесценция. Это бывает в случае, когда квант поглощался уже возбужденной молекулой. Тогда в квант люминесценции входит не только часть энергии поглощенного кванта, но и энергия возбуждения молекулы.**

**Существенной особенностью жидких и твердых люминофоров является независимость их спектра люминесценции от длины волны возбуждающего света. Благодаря этому по спектру фотолюминесценции можно судить о природе вещества жидких и твердых люминофоров.**

**Энергетический выход люминесценции может при некоторых условиях быть очень большим, достигающим 0,8; у жидких и твердых тел он зависит от длины волны возбуждающего света.**

**Согласно закону Вавилова,**

Степень преобразования поглощаемой энергии  $W_0$  в энергию люминесценции  $W$  характеризуется энергетическим выходом люминесценции:

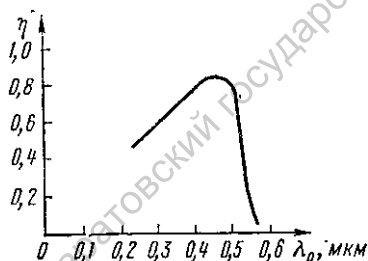
$$\eta = \frac{W}{W_0}.$$

*энергетический выход люминесценции сначала растет пропорционально длине волны возбуждающего света, а затем (достигнув максимума) резко падает до нуля.*

На рис. приведен график этой зависимости, полученный для раствора флуоресцеина.

Как и правило Стокса, закон Вавилова объясняется квантовыми свойствами света. Действительно, представим себе наиболее благоприятный случай, когда каждый квант возбуждающего света приводит к образованию кванта люминесценции. Тогда энергетический выход люминесценции, очевидно, равен отношению этих квантов:

$$\eta = \frac{\nu}{\nu_0} = \frac{\lambda_0}{\lambda}.$$



Люминесценция находит широкое применение в осветительной технике: на ней, например, основана люминесцентная лампа. Люминесцентная лампа состоит из стеклянной трубки, у которой внутренняя поверхность

стенок покрыта тонким слоем люминофора (рис.). В торцы трубки впаяны электроды. Трубка наполнена парами ртути и аргоном; парциальное давление паров ртути составляет около 1 Па, парциальное давление аргона — 400 Па.



Люминесцентная лампа включается в электросеть последовательно с дросселем и стартером (служащим для предварительного разогрева электродов).

Возникающий в лампе газовый разряд вызывает электролюминесценцию паров ртути. В спектре этой люминесценции наряду с видимым светом имеется ультрафиолетовое излучение (длиной волны 0,257 мкм), оно возбуждает фотолюминесценцию люминофора, нанесенного на стенки лампы. Таким образом, в люминесцентной лампе совершается двойное преобразование энергии: электрическая энергия превращается в энергию ультрафиолетового излучения паров ртути, которая в свою очередь превращается в энергию видимого излучения люминофора.

Изменяя состав люминофора, можно изготовлять лампы с требуемым спектром фотолюминесценции. Таким путем изготовляются люминесцентные лампы белого света, тепло-белого света, холодно-белого света и дневного света.

Спектральный состав излучения ламп дневного света близок к рассеянному свету северной части небосвода; лампа холодно-белого света имеет спектр, подобный спектру прямой солнечной радиации.

В связи с этим люминесцентные лампы успешно применяются для «досвечивания» сельскохозяйственных культур, выращиваемых на защищенном грунте.

Распределение энергии  $W_x$  в спектре излучения лампы дневного света показано на рис.

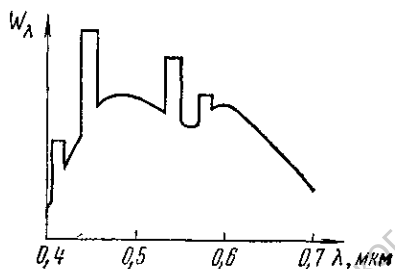
Люминесцентные лампы экономичны (их световой коэффициент полезного действия в 10—20 раз больше, чем у ламп накаливания) и весьма долговечны (срок службы доходит до 10000 часов).

Другим важным применением люминесценции является люминесцентный анализ — метод определения состава вещества по спектру его фотолюминесценции, возбуждаемой ультрафиолетовыми лучами. Будучи очень чувствительным, люминесцентный анализ позволяет обнаружить малейшие изменения в химическом составе вещества и тем самым выявлять различие между объектами, кажущимися совершенно одинаковыми. Этим методом можно, например, выявлять самые начальные стадии загнивания пищевых продуктов (люминесцентный контроль свежести продуктов), обнаруживать следы нефти в пробах почвы, извлеченных из буровых скважин (люминесцентная разведка нефти), и т. п.

С помощью фотолюминесценции можно обнаружить тончайшие трещины на поверхности деталей машин и других изделий (люминесцентная дефектоскопия). Для этого поверхность исследуемого изделия смазывают жидким люминофором. Через 15—20 мин поверхность обмывают и вытирают. Однако в трещинах поверхности люминофор остается. Свечение этого люминофора (при ультрафиолетовом облучении изделия) отчетливо обрисует конфигурацию трещин.

Укажем, наконец, на использование фотолюминесценции для маскировочного освещения и декоративных целей (применение флуоресцирующих и фосфоресцирующих красок).

При фотолюминесценции атомы люминесцирующего вещества излучают совершенно несогласованно (беспорядочно): их излучения разновременны, имеют различные частоты и разности фаз, распространяются по всевозможным направлениям.



Поэтому яркость фотолюминесценции оказывается незначительной. Однако в последние годы удалось найти способ искусственно вызывать когерентное одинаково направленное излучение множества атомов, создающее узкий пучок монохроматического света, превосходящего по яркости обычную люминесценцию в миллионы раз. Прибор, в котором осуществляется такое излучение, назван оптическим квантовым генератором, или лазером.

Название «лазер» образовано из первых букв английских слов: **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation** (усиление света посредством вынужденного излучения). В зависимости от применяемого рабочего вещества различают кристаллические, газовые и жидкостные лазеры.

Чтобы лазер начал действовать, необходимо перевести большое число атомов его рабочего вещества в одинаковые возбужденные состояния, так называемые метастабильные состояния, в которых атом пребывает сравнительно долгое время (значительно превышающее  $10^{-8}$  с). Для этого рабочему веществу передается достаточная электромагнитная энергия от специального источника (метод «накачки»). Теперь в рабочем веществе лазера (имеющем форму тонкого длинного цилиндра, одним основанием которого является зеркало, другим — частично прозрачное зеркало) начнутся почти одновременные

вынужденные переходы всех возбужденных атомов в нормальное состояние. Эти переходы сопровождаются почти одновременным испусканием множества световых квантов, имеющих одинаковую частоту и фазу и движущихся по одному направлению — вдоль оси лазера. Поток этих фотонов и образует узкий, мощный пучок монохроматического света, выходящий из лазера.

Лазер дает световой пучок очень малой расходимости. Будучи, например, направлен на Луну, такой пучок создает на ее поверхности световое пятно диаметром всего лишь в 3 км (луч обычного прожектора создал бы на таком же расстоянии световое пятно диаметром в 40 000 км). Плотность энергии в луче лазера исключительно велика — тысячи и десятки тысяч Дж/(см<sup>2</sup> • с); причем расчеты показывают, что это еще далеко не предельные значения возможных плотностей. С помощью линзы можно сфокусировать свет лазера так, что он мгновенно расплавит и испарит освещенный участок любого материала.

Все это делает лазер исключительно перспективным прибором, уже сейчас широко используемым во многих областях науки и техники. Сварка микрообъектов, сверление и резка сверхтвердых материалов, ускорение хода химических реакций, передача световых сигналов на сверхдальние расстояния (космическая связь), глазная хирургия (разрушение опухолей на сетчатке) — таков далеко не полный перечень применений лазера.

Отметим, что наряду с оптическими квантовыми генераторами созданы квантовые генераторы в диапазоне коротких радиоволн — мазеры.

## **Фотоэффект. Законы фотоэффекта. Фотоэлементы**

**Фотоэффектом называется освобождение (полное или частичное) электронов от связей с атомами и молекулами вещества под воздействием света (видимого, инфракрасного и ультрафиолетового). Если электроны выходят за пределы освещаемого вещества (полное освобождение), то фотоэффект называется внешним. Если же электроны теряют связь только со «своими» атомами и молекулами, но остаются внутри освещаемого вещества в качестве «свободных электронов» (частичное освобождение), увеличивая тем самым электропроводность вещества, то фотоэффект называется внутренним.**

**Внешний фотоэффект наблюдается у металлов. Если, например, цинковую пластинку, соединенную с электроскопом и заряженную отрицательно, осветить ультрафиолетовыми лучами, то электроскоп быстро разрядится; в случае положительно заряженной пластинки разрядки не происходит. Отсюда следует, что свет вырывает из металла отрицательно заряженные частицы; определение величины их заряда показало, что эти частицы являются электронами.**

**Принципиальная измерительная схема, с помощью которой исследовался внешний фотоэффект, изображена на рис. Отрицательный полюс батареи присоединен к металлической пластинке К (катод), положительный — к вспомогательному электроду А (анод). Оба электрода помещены в вакуумированный сосуд, имеющий кварцевое окно F (прозрачное для оптического излучения). Поскольку**



электрическая цепь оказывается разомкнутой, ток в ней отсутствует. При освещении катода К свет вырывает из него электроны (фотоэлектроны), устремляющиеся к аноду; в цепи появляется ток (фототок).

Схема дает возможность измерять силу фототока (гальванометром G) и скорость фотоэлектронов при различных значениях напряжения (U) между катодом и анодом и при различных условиях освещения катода.

Экспериментальные исследования привели к установлению следующих основных законов внешнего фотоэффекта.

*1. Фототок насыщения I (т. е. максимальное число электронов, освобождаемых светом в 1 с) прямо пропорционален световому потоку  $\Phi$ :*

$$I = k\Phi,$$

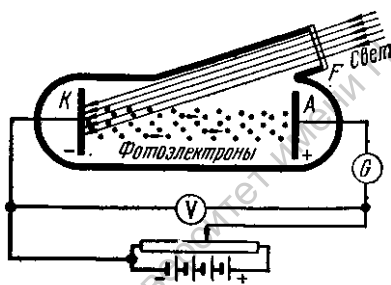
где коэффициент k называется фоточувствительностью освещаемой поверхности (измеряется в микроамперах на люмен — мкА/лм).

*2. Скорость фотоэлектронов возрастает с увеличением частоты падающего света и не зависит от его интенсивности.*

*3. Независимо от интенсивности света фотоэффект начинается только при определенной {для данного металла} минимальной частоте света, называемой «красной границей» фотоэффекта.*

Второй и третий законы фотоэффекта нельзя объяснить на основе волновой теории света. Действительно, по этой теории, интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды электромагнитной волны, «раскачивающей» электрон в металле. Поэтому свет любой частоты, но достаточно большой интенсивности, должен был бы

вырывать электроны из металла; иначе говоря, не должно было бы существовать «красной границы» фотоэффекта. Этот вывод противоречит третьему закону фотоэффекта. Далее, чем больше интенсивность света, тем большую кинетическую энергию должен был бы получить от него электрон. Поэтому скорость фотоэлектрона должна была бы возрастать с увеличением интенсивности света; этот вывод противоречит второму закону фотоэффекта.



Саратовский государственный университет имени Г. Чернышевского

Законы внешнего фотоэффекта получают простое истолкование на основе квантовой теории света. По этой теории, величина светового потока определяется числом световых квантов (фотонов), падающих в единицу времени на поверхность металла. Каждый фотон может взаимодействовать только с одним электроном. Поэтому максимальное число фотоэлектронов должно быть пропорционально световому потоку (первый закон фотоэффекта).

Энергия фотона, поглощенная электроном, расходуется на совершение электроном работы выхода  $A$  из металла; оставшаяся часть этой энергии представляет собой кинетическую энергию фотоэлектрона. Тогда, согласно закону сохранения энергии, можно написать

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + A.$$

Эта формула, подтвержденная многочисленными экспериментами, называется уравнением Эйнштейна.

Из уравнения Эйнштейна непосредственно видно, что скорость фотоэлектрона возрастает с увеличением частоты света и не зависит от его интенсивности. Этот вывод соответствует второму закону фотоэффекта.

Согласно формуле, с уменьшением частоты света кинетическая энергия фотоэлектронов уменьшается (величина  $A$  постоянна для данного освещаемого вещества). При некоторой достаточно малой частоте кинетическая энергия фотоэлектрона станет равной нулю ( $m v^2/2 = 0$ ) и фотоэффект прекратится (третий закон фотоэффекта). Это имеет место при  $h\nu_0 = A$ , т. е. в случае, когда вся энергия фотона расходуется на совершение работы выхода электрона. Тогда

$$\nu_0 = \frac{A}{h}, \quad \text{или} \quad \lambda_0 = \frac{hc}{A}$$

Металл	$X_0$ , мкм	$\lambda_0$ , эВ
Платина.....	0,235	5,29
Вольфрам ....	0,276	4,50
Цинк.....	0,290	4,19
Торий .....	0,364	3,41
Натрий.....	0,552	2,25
Цезий .....	0,62	1,89
	0	
Цезиевая пленка на вольфраме	0,913	1,36

Формулы определяют «красную границу» фотоэффекта. Из этих формул следует, что она зависит от величины работы выхода (от материала фотокатода).

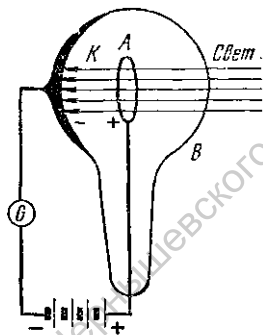
В таблице приведены значения работы выхода  $A$  (в электрон-вольтах) и красной границы фотоэффекта  $X_0$  (в микрометрах) для некоторых металлов.

Из таблицы видно, что, например, цезиевая пленка, нанесенная на вольфрам, дает фотоэффект даже при инфракрасном облучении, у натрия фотоэффект может быть вызван только видимым и ультрафиолетовым светом, а у цинка — только ультрафиолетовым.

На внешнем фотоэффекте основан важный физико-технический прибор, называемый вакуумным фотоэлементом

(он является некоторым видоизменением установки, схематически изображенной на рис.).

Катодом  $K$  вакуумного фотоэлемента служит слой металла, нанесенный на внутреннюю поверхность эвакуированного стеклянного баллона  $B$  ( $G$  — гальванометр); анод  $A$  выполнен в виде металлического кольца, помещенного в центральной части баллона. При освещении катода в цепи фотоэлемента возникает электрический ток, сила которого пропорциональна величине светового потока.

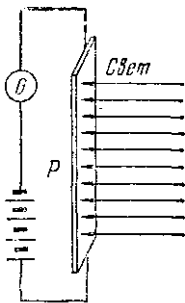


Большинство современных фотоэлементов имеет сурьмяно-цезиевые или кислородно-цезиевые катоды, обладающие высокой фоточувствительностью. Кислородно-цезиевые фотоэлементы чувствительны к инфракрасному и видимому свету (чувствительность 20 - 80 мкА/лм); сурьмяно-цезиевые фотоэлементы чувствительны к видимому и ультрафиолетовому свету (чувствительность 50 -150 мкА/лм).

В некоторых случаях для увеличения чувствительности фотоэлемента его наполняют аргоном при давлении порядка 1 Па. Фототок в таком фотоэлементе усиливается вследствие ионизации аргона, вызванной столкновениями фотоэлектронов с атомами аргона. Фоточувствительность газонаполненных фотоэлементов составляет около 1000 мкА/лм.

Внутренний фотоэффект наблюдается у полупроводников и в меньшей мере у диэлектриков. Схема наблюдения внутреннего фотоэффекта показана на рис. Полупроводниковая пластинка  $P$  присоединена

последовательное гальванометром  $G$  к полюсам батареи. Ток в этой цепи незначителен, поскольку полупроводник обладает большим сопротивлением. Однако при освещении пластинки ток в цепи резко возрастает. Это обусловлено тем, что свет вырывает из атомов полупроводника электроны, которые, оставаясь внутри полупроводника, увеличивают его электропроводность (уменьшают сопротивление).

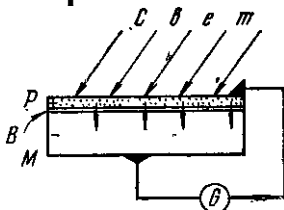


Фотоэлементы, основанные на внутреннем фотоэффекте, называются полупроводниковыми

Фотоэлементами или фотосопротивлениями. Для их изготовления используют селен, сернистый свинец, сернистый кадмий и некоторые другие полупроводники. Фоточувствительность полупроводниковых фотоэлементов в сотни раз превышает фоточувствительность вакуумных фотоэлементов. Некоторые фотоэлементы обладают отчетливо выраженной спектральной чувствительностью. У селенового фотоэлемента спектральная чувствительность близка к спектральной чувствительности человеческого глаза.

Недостатком полупроводниковых фотоэлементов является их заметная инерционность: изменение фототока запаздывает относительно изменения освещенности фотоэлемента. Поэтому полупроводниковые фотоэлементы непригодны для регистрации быстропеременных световых потоков.

На внутреннем фотоэффекте основана еще одна разновидность фотоэлемента — полупроводниковый фотоэлемент с запирающим слоем или вентильный фотоэлемент. Схема этого фотоэлемента дана на рис.



Металлическая пластинка М и нанесенный на нее тонкий слой полупроводника Р соединены внешней электрической цепью, содержащей гальванометр G. Как было показано, в зоне контакта полупроводника с металлом образуется запирающий слой В, обладающий вентильной проводимостью: он пропускает электроны только в направлении от полупроводника к металлу. При освещении полупроводникового слоя в нем, благодаря внутреннему фотоэффекту, появляются свободные электроны. Проходя (в процессе хаотического движения) через запирающий слой в металл и не имея возможности перемещаться в обратном направлении, эти электроны образуют в металле избыточный отрицательный заряд. Полупроводник, лишенный части «своих» электронов, приобретает положительный заряд. Разность потенциалов (порядка 0,1 В), возникающая между полупроводником и металлом, создает ток в цепи фотоэлемента.

Таким образом, вентильный фотоэлемент представляет собой генератор тока, непосредственно преобразующий световую энергию в электрическую.

В качестве полупроводников в вентильном фотоэлементе используют селен, закись меди, сернистый таллий,

германий, кремний. Фоточувствительность вентильных фотоэлементов составляет 2000 — 30000 мкА/лм.

Коэффициент полезного действия современных кремниевых фотоэлементов (освещаемых солнечным светом) достигает 12—15%; по теоретическим расчетам, его можно повысить до 22%.

Поскольку фототок пропорционален световому потоку, фотоэлементы используются в качестве фотометрических приборов. К таким приборам относятся, например, люксметр (измеритель освещенности) и фотоэлектрический экспонометр.

Фотоэлемент позволяет преобразовывать колебания светового потока в соответствующие колебания фототока, что находит широкое применение в технике звукового кино, телевидения и т. п.

Исключительно велико значение фотоэлементов для телемеханизации и автоматизации производственных процессов. В сочетании с электронным усилителем и реле фотоэлемент является неотъемлемой частью автоматических устройств, которые, реагируя на световые сигналы, управляют работой различных промышленных и сельскохозяйственных установок и транспортных механизмов.

Весьма перспективным является практическое использование вентильных фотоэлементов в качестве генераторов электроэнергии. Батареи кремниевых фотоэлементов, получившие название солнечных батарей, успешно применяются на космических спутниках и кораблях для питания радиоаппаратуры. Для этого общая площадь фотоэлементов должна быть достаточно большой. Например, на космическом корабле «Союз-3» площадь поверхности солнечных батарей составляла около 14 м<sup>2</sup>.



Когда коэффициент полезного действия солнечных батарей будет повышен до 20—22%, они, несомненно, приобретут первостепенное значение среди источников, вырабатывающих электроэнергию для производственных и бытовых нужд.

**Масса и импульс фотона. Световое давление.**

**Эффект Комптона. Флуктуации света**

В первой части курса мы познакомились с универсальным законом взаимосвязи (пропорциональности) массы и энергии:

$$W = mc^2,$$

где в самом общем случае  $m$  есть масса материи (частицы, или системы частиц, или, наконец, области поля)..  
Применим этот закон к световому кванту — фотону — для определения его массы и количества движения (импульса).

Так как фотон обладает энергией  $W$ , то он должен иметь массу

$$m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}.$$

Фотон движется со скоростью света  $c$ , поэтому его количество движения (импульс)

$$m_{\phi}c = \frac{h\nu}{c}.$$

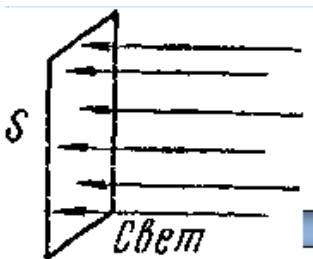
Отсюда следует, что с увеличением частоты излучения масса и импульс фотона возрастают; их численные значения для некоторых видов излучения приведены в таблице.

Вид излучения	$\nu$ , Гц	$m_{\text{ф}}$ , кг
Видимый свет.....	$5,4 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{-36}$
Ультрафиолетовые лучи . .	$3 \cdot 10^{14}$	$2,2 \cdot 10^{-35}$
Жесткие рентгеновские лучи	$8 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{-32}$
Гамма-излучение	$3 \cdot 10^{14}$	$2,2 \cdot 10^{-30}$

Масса фотона оказывается крайне малой; однако для жестких рентгеновских лучей она уже сравнима с массой электрона, а для гамма- излучения даже превышает массу электрона.

Поскольку фотоны обладают количеством движения (импульсом), световой поток должен оказывать давление на преграды, встречающиеся на его пути. Проще всего рассчитать световое давление на основе квантовой теории, рассматривая свет как поток фотонов.

Пусть монохроматический пучок света частотой  $\nu$  и интенсивностью  $J$  падает нормально на некоторую площадку  $S$  (рис.). Так как интенсивность  $J$  есть энергия света, падающего на площадь в  $1 \text{ м}^2$  за  $1 \text{ с}$ , то



$$J = N h \nu,$$

где  $N$  — число фотонов, падающих на площадь в  $1 \text{ м}^2$  за  $1 \text{ с}$ .

Импульс силы, сообщаемый фотоном площадке  $S$ , равен, согласно закону изменения количества движения, разности количеств движения фотона до и после «удара» фотона о площадку. Если площадка полностью поглощает свет, то этот импульс будет равен

$$\frac{h\nu}{c} - 0 = \frac{h\nu}{c}$$

(количество движения фотона после удара равно нулю, поскольку поглощен фотон поглощен). Если же площадка полностью отражает свет, то фотон сообщит ей импульс

$$\frac{h\nu}{c} - \left(-\frac{h\nu}{c}\right) = 2 \frac{h\nu}{c}$$

(количества движения падающего и отраженного фотонов имеют противоположные знаки).

Давление света  $p$  равно полному импульсу, полученному за  $1 \text{ сек}$  площадкой в  $1 \text{ м}^2$  от всех  $N$  падающих на нее фотонов.

$$p = 2N \frac{h\nu}{c}$$

(для отражающей площадки). Тогда получим

$$p = \frac{J}{c}$$

Следовательно,

$$p = N \frac{h\nu}{c}$$

(для поглощающей площадки) и

$$p = \frac{2J}{c}$$

(для отражающей площадки).

Отметим, что к таким же результатам приводит электромагнитная (волновая) теория Максвелла.

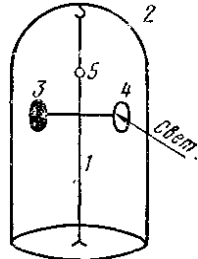
Экспериментально световое давление было впервые обнаружено и измерено посредством очень тонкого опыта. Принципиальная схема этого опыта дана на рис. К стеклянной нити 1, натянутой в вакууммированном сосуде 2, прикреплены две легкие пластинки 3 и 4, одна из которых имеет зачерненную поверхность (поглощает свет), а другая — блестящую (отражает свет)

Пластинка, на которую направлялся пучок света, смещалась под действием светового давления. При этом нить закручивалась на некоторый угол, измерявшийся с помощью зрительной трубы и зеркальца 5, приклеенного к нити. По величине угла закручивания рассчитывалось давление света на пластинку.

Значения светового давления, полученные на опыте, совпали с теоретически рассчитанными значениями давления света. В частности, оказалось, что давление света на отражающую поверхность (блестящую пластинку) вдвое больше, чем на поглощающую (зачерненную пластинку)

Несмотря на то, что световое давление одинаково успешно объясняется и квантовой и волновой теориями, данное

явление имеет специфически квантовый характер. Это особенно отчетливо обнаруживается при освещении малых объектов слабым световым потоком, содержащим небольшое число «массивных» фотонов, например при освещении свободных электронов жесткими рентгеновскими лучами. В этом случае электрон испытывает заметные толчки от отдельных фотонов.



Взаимодействие фотонов с электронами впервые наблюдалось на опыте - при рентгеновском облучении вещества, содержащего свободные или слабо связанные электроны, происходит рассеяние рентгеновских лучей, сопровождающееся увеличением длины волны рассеянного излучения (эффект Комптона). Фотон, имеющий энергию  $h\nu_{Qt}$  сталкиваясь с электроном  $e_y$  передает ему часть своей энергии. В результате электрон отскакивает в сторону, а фотон изменяет направление своего движения (рассеивается). Очевидно, что энергия рассеянного фотона  $h\nu < h\nu_0$  (поскольку часть энергии фотон передал электрону). Следовательно,  $\nu < \nu_0$ , а  $\lambda > \lambda_0$  (где  $\lambda$  и  $\lambda_0$  — длины волн рассеянного и падающего фотонов).

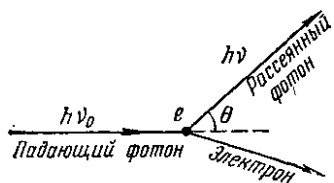
Опыт и теория показывают, что увеличение длины волны рассеянного фотона  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$  зависит только от угла рассеяния  $\Theta$ :

$$\Delta\lambda = 0,00242 (1 - \cos \Theta) \text{ нм.}$$

Самым простым и наглядным подтверждением квантовых свойств света являются опыты, непосредственного наблюдения флуктуации яркости слабого светового потока, вызванные случайными изменениями числа фотонов в этом потоке.

Дело в том, что порог чувствительности глаза очень низок: в области зеленого света ( $\lambda = 0,550 \text{ мкм}$ ) глаз, адаптированный к темноте, способен реагировать на световой поток, соответствующий примерно всего лишь 50—100 фотонам, падающим на сетчатку за 1 с.

Наблюдался пучок света, который автоматически перекрывался каждую секунду на промежуток времени в 0,9 с. Пока световой поток был не слишком слабым, наблюдатель воспринимал каждую вспышку света (длительность в течение 0,1 с). Однако при достаточно слабом световом потоке некоторые вспышки уже не оказывали воздействия на глаз наблюдателя. Чем слабее становился



световой поток, тем чаще получались пропуски вспышек. Очевидно, что этим пропускам соответствовали такие участки слабого светового пучка, в которых число фотонов оказывалось, по случайным причинам, меньше порогового значения. Таким образом, были непосредственно обнаружены флуктуации числа фотонов в световом потоке, подтвердившие фотонную структуру света.

Заканчивая обзор свойств света и процессов взаимодействия света с веществом, следует еще раз подчеркнуть, что свет имеет двойственную (корпускулярно-волновую) природу: фотон является частицей (массой  $m_{\text{ф}}$ ) и вместе с тем волной (частотой  $\nu$ ).

С позиции привычных (классических) представлений, основанных на наблюдении за объектами макромира, такая двойственность кажется совершенно недопустимой. Частица макромира занимает ограниченную область пространства и движется по определенной траектории (или покоится); волна же распределена в пространстве непрерывно и ее

энергия передается всем точкам пространства. Поэтому, нельзя представить себе объект макромира, в котором совмещались бы и свойства частицы и свойства волны.

Однако нет никаких оснований приписывать микрочастицам все свойства частиц макромира. Ведь не пытаемся же мы приписать, например, электрону какой-либо запах, цвет, шероховатость и т.п., хотя эти свойства, безусловно, присущи микрочастице.

Микрообъекты существенно (качественно) отличаются от привычных объектов макромира. В частности, некоторым микрочастицам (элементарным частицам) свойственны взаимные превращения.

Итак, двойственность природы микрочастиц, в том числе и фотона, следует воспринимать как объективную реальность, отражающую многообразие свойств материи.

**Задача 1.** Вследствие лучеиспускания Земля теряет в среднем 91 Дж в секунду с каждого квадратного метра своей поверхности. Принимая Землю за абсолютно черное тело, определить среднюю температуру  $T$  ее поверхности и длину волны  $\lambda_T$ , на которую приходится максимум излучаемой энергии.

Решение. По закону Стефана — Больцмана,

$$\mathcal{E} = \sigma T^4,$$

Тогда

$$T = \sqrt[4]{\frac{\mathcal{E}}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{91 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})}{5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}^4)}} = 200\text{К} = -73^\circ \text{С}.$$

Согласно закону Вина,

$$\lambda_m T = b,$$

где  $b$  — постоянная Вина. Поэтому

$$\lambda_m = \frac{b}{T} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}}{200 \text{ К}} = 1,45 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 14,5 \text{ мкм.}$$

$$\varepsilon = 91 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

— лучеиспускательная способность Земли.

Таким образом, максимум лучеиспускательной способности Земли приходится на длинноволновую (инфракрасную) часть спектра.

Необходимо пояснить, что столь низкую рассчитанную нами среднюю (температуру 200 К) Земля имела бы в отсутствие атмосферы. Атмосфера (точнее, всегда содержащийся в ней водяной пар) очень сильно поглощает длинноволновое излучение Земли и нагревается им. Нагретая атмосфера в свою очередь лучеиспускает. Часть этого излучения идет к Земле и поглощается ею, вызывая нагревание земной поверхности. Поэтому фактическая средняя температура Земли оказывается значительно более высокой, чем рассчитанная нами. Таким образом, атмосфера предохраняет Землю от чрезмерного охлаждения, создает грандиозный по масштабу (для всей Земли в целом) парниковый эффект.

**Задача 2.** Найти угловую скорость  $\omega$  и период вращения  $T$  электрона на первой боровской орбите в атоме водорода.

**Решение.** По первому постулату Бора,

$$mvr = n \frac{h}{2\pi},$$

где  $m$  — масса электрона,  $r$  — радиус орбиты,  $n = 1$  — квантовое число, соответствующее первой орбите.

Учитывая, что  $v = \omega r$ , можем написать



$$m\omega r^2 = n \frac{\hbar}{2\pi}.$$

$$r = n^2 \frac{\varepsilon_0 \hbar^2}{\pi m e^2},$$

где  $e$  — заряд электрона,  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная. Подставляя это выражение радиуса в формулу первого постулата Бора, получим

$$\omega = \frac{\pi m e^4}{2 \varepsilon_0^2 n^4 \hbar^4} = \frac{3,14 \text{ рад} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 1,6^4 \cdot 10^{-76} \text{ Кл}^4}{2 \cdot 8,85^2 \cdot 10^{-24} \text{ Ф}^2/\text{м}^2 \cdot 6,625^3 \cdot 10^{-102} \text{ Дж}^3 \cdot \text{с}^3} = 4,4 \cdot 10^{16} \text{ рад/с}$$

$$\left( \frac{\text{рад} \cdot \text{кг} \cdot \text{Кл}^4 \cdot \text{м}^2}{\text{Дж}^3 \cdot \text{с}^2 \cdot \text{Ф}^2} = \frac{\text{рад} \cdot \text{Дж} \cdot \text{Кл}^4}{\text{Дж}^3 \cdot \text{с} \cdot \text{Ф}^2} = \frac{\text{рад} \cdot \text{Кл}^2 \cdot \text{В}^2}{\text{с} \cdot \text{Дж}^2} = \frac{\text{рад}}{\text{с}} \right)$$

**Период вращения электрона найдем из соотношения**

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{6,28 \text{ рад}}{4,4 \cdot 10^{16} \text{ рад/с}} = 1,43 \cdot 10^{-16} \text{ с}.$$

**Задача 3.** Красная граница фотоэффекта для вольфрама  $\lambda_0 = 275 \text{ нм}$ . Определить работу выхода  $A$  электрона из вольфрама и максимальную скорость  $v_m$  электронов, вырываемых из вольфрама светом с длиной волны  $\lambda = 180 \text{ нм}$ .

**Решение.** Согласно формуле, выражающей красную границу фотоэффекта,

$$\lambda_0 = \frac{hc}{A},$$

где  $c$  — скорость света в вакууме. Поэтому

$$A = \frac{hc}{\lambda_0} = \frac{6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{2,75 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 7,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} =$$

$$= \frac{7,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/эВ}} = 4,5 \text{ эВ}.$$

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

$\nu = c/\lambda$  частота света.

Тогда

$$v_m = \sqrt{\frac{2(hc - A\lambda)}{m\lambda}} =$$

$$= \sqrt{\frac{2(6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} - 7,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \cdot 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ м})}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}}} =$$

$$= 9,1 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

**Задача 4.** Вычислить длину волны фотона, импульс которого равен импульсу электрона, обладающего скоростью  $v = 10^4$  км/с.

**Решение.** Импульс фотона равен  $h\nu/c$ , где  $\nu$  и  $c$  — частота и скорость фотона. Приравняв этот импульс импульсу электрона  $mv$ , и учитывая, что  $\nu = c/\lambda$ , получим

$$\frac{h}{\lambda} = mv,$$

откуда

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 10^7 \text{ м/с}} = 7,3 \cdot 10^{-11} \text{ м} = 73 \text{ пм}.$$

**Такая длина волны соответствует частоте  $\nu = 4,1 \cdot 10^{18}$  Гц; следовательно, данный фотон принадлежит к жестким рентгеновским лучам (см. таблицу).**

Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### 1. Практические занятия

1. Кинематические характеристики в простейших видах движения: прямолинейное равномерное, прямолинейное равнопеременное, равномерное и равнопеременное движение по окружности.
2. Законы Ньютона. Импульс системы материальных точек. Закон сохранения импульса.
3. Работа силы. Потенциальная энергия. Кинетическая энергия. Закон сохранения энергии в механике.
4. Свободные и вынужденные колебания линейного гармонического осциллятора
5. Поперечные и продольные волны. Уравнение плоской бегущей волны.
6. Движение жидкости. Закон Бернулли.
7. Теплота и работа. Первое начало термодинамики. Работа в изопроцессах. Теплоемкости
8. Основные положения молекулярно-кинетической теории вещества. Основное уравнение кинетической теории идеального газа.
9. Закон Кулона. Электростатическое поле и его напряженность. Теорема Остроградского-Гаусса.
10. Потенциал электростатического поля. Связь потенциала с напряженностью. Энергия электрического поля.
11. Электрический ток, сила тока, напряжение, ЭДС. Закон Ома для неоднородного участка цепи.
12. Магнитное поле, магнитная индукция. Закон Ампера и сила Лоренца.
13. Электромагнитная индукция. Закон Фарадея.
14. Закон Ома в цепи переменного тока.
15. Электромагнитная волна.
16. Интерференция и дифракция света.
17. Формула Планка. Внешний фотоэффект. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
18. Ядерная модель атома. Постулаты Бора. Атом водорода по Бору.

Механика, Молекулярная физика

1. Система отсчета. Материальная точка. Траектория движения. Путь. Перемещение. Скорость. Ускорение.
2. Кинематические характеристики в простейших видах движения: прямолинейное равномерное, прямолинейное равнопеременное, равномерное и равнопеременное движение по окружности.
3. Силы в природе. Примеры. Законы Ньютона. Система единиц.
4. Центр инерции. Внутренние и внешние силы. Уравнение движения центра инерции.
5. Импульс материальной точки. Импульс системы материальных точек. Закон сохранения импульса.
6. Момент импульса материальной точки. Момент импульса системы материальных точек. Момент силы.
7. Закон сохранения момента импульса системы материальных точек.
8. Вращательное движение твердого тела относительно закрепленной оси. Угловая скорость и ускорение. Уравнение вращательного движения. Момент инерции.
9. Работа силы. Консервативные силы. Потенциальная энергия. Кинетическая энергия. Закон сохранения энергии в механике.
10. Движение частицы в центральном поле. Задача Кеплера. Космические скорости.
11. Свободные и вынужденные колебания линейного гармонического осциллятора в отсутствие и при наличии трения.
12. Волны в упругой среде. Поперечные и продольные волны. Уравнение плоской бегущей волны. Звуковые волны. Инфра и ультра звук.
13. Неинерциальные системы отсчета. Сила инерции. Понятие о принципе эквивалентности.
14. Закон Паскаля и Архимеда. Движение жидкости. Закон Бернулли для идеальной жидкости.
15. Специальная теория относительности Постулаты Эйнштейна. Преобразования Лоренца.
16. Следствие из преобразований Лоренца: относительность временных и пространственных интервалов.
17. Зависимость массы от скорости. Связь между массой и энергией. Кинетическая энергия в теории относительности. Релятивистский импульс.
18. Термодинамическая система параметры процесс и состояние равновесия. Уравнение состояния идеального газа.
19. Теплота и работа. Первое начало термодинамики. Работа в изопроцессах. Теплоемкости.
20. Цикл Карно. КПД идеальной тепловой машины работающей на цикле Карно.
21. Второе начало термодинамики. Статистический смысл энтропии.
22. Реальный газ. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Критическое состояние. Экспериментальные изотермы.
23. Фазовые переходы первого рода. Уравнение Клаузиуса-Клайперона. Понятие о фазовых переходах второго рода
24. Основные положения молекулярно-кинетической теории вещества. Кинетический смысл температуры.
25. Распределение Максвелла частиц газа по скоростям. Характерные скорости молекул газа.
26. Распределение Больцмана частиц идеального газа по пространству под действием внешнего поля. Барометрическая формула.

1. Взаимодействие неподвижных зарядов. Закон Кулона. Электростатическое поле и его напряженность. Теорема Остроградского-Гаусса.
2. Потенциал электростатического поля. Связь потенциала с напряженностью. Работа перемещения заряда в поле.
3. Электрическое поле в проводниках. Емкость. Конденсаторы. Энергия электрического поля.
4. Диполь во внешнем поле. Полярные и неполярные диэлектрики. Поляризация диэлектриков. Вектор поляризации. Вектор электрического смещения.
5. Электрический ток, сила тока, напряжение, ЭДС. Закон Ома для неоднородного участка цепи. Работа и мощность постоянного тока. Закон Джоуля - Ленца.
6. Электропроводность жидкостей газов и твердых тел. Ток в вакууме.
7. Магнитное поле, магнитная индукция. Закон Био-Савара-Лапласа. Поле прямого тока. Вихревой характер магнитного поля.
8. Действие магнитного поля на ток. Закон Ампера и сила Лоренца.
9. Электромагнитная индукция. Закон Фарадея. Самоиндукция, взаимная индукция, Энергия магнитного поля.
10. Переменный электрический ток. Активное, емкостное, индуктивное сопротивление. Закон Ома в цепи переменного тока.
11. Колебательный контур. Свободные и вынужденные колебания в контуре.
12. Ток смещения. Полная система уравнений Максвелла в интегральной дифференциальной форме.
13. Электромагнитная волна. Скорость распространения электромагнитных волн. Электромагнитная природа света.
14. Когерентные источники света. Принцип Гюйгенса-Френеля.
15. Интерференция света. Условия  $m\pi$  и  $(2m+1)\pi/2$  освещенности интерференционной картины.
16. Способы получения интерференционной картины.
17. Дифракция света. Дифракция Френеля на круглом отверстии. Дифракционная решетка.
18. Естественный и поляризованный свет. Методы получения поляризованного света. Законы Брюстера и Малюса.
19. Понятие о равновесном тепловом излучении. Закон Кирхгофа. Законы излучения абсолютно черного тела. Формула Планка.
20. Внешний фотоэффект. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
21. Энергия, импульс и масса фотона.
22. Опыты Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц. Ядерная модель атома. Постулаты Бора. Атом водорода по Бору.
23. Волны де Бройля. Дифракция частиц.
24. Волновая функция и ее статистическая интерпретация. Уравнение Шредингера. Задача о частице в прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками.
25. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.
26. Спин частиц. Системы, состоящие из одинаковых частиц. Принцип тождественности частиц. Принцип Паули.
27. Описание состояния электрона в атоме квантовыми числами. Периодическая система элементов Д.И. Менделеева.
28. Элементы квантовой статистики. Статистика Больцмана. Теория теплоемкостей твердых тел.
29. Статистика Ферми-Дирака. Электронный газ. Уровень Ферми.

30. Статистика Бозе-Эйнштейна. Равновесное излучение. Формула Планка для излучения абсолютно-черного тела.
31. Радиоактивность.  $\alpha$ - и  $\beta$ -распады. Правило смещения при радиоактивных распадах.
32. Характеристики атомного ядра. Состав заряд масса спин и магнитный момент ядра. Стабильные и радиоактивные ядра.
33. Дефект массы и энергия связи ядра. Ядерные реакции. Реакции деления. Реакторы.
34. Термоядерные реакции. Проблема управления термоядерной реакцией.
35. Методы регистрации элементарных частиц.
36. Представление о классификации элементарных частиц. Частицы и античастицы.
37. Понятие о составных моделях частиц. Кварки

### 3. Перечень средств обучения

1. Комплект лекционных экспериментальных демонстраций.
2. Оборудование для проведения лабораторных работ по физике.
3. Комплект учебных видео - фильмов по физике.

### 4. Литература. (основная)

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики т.1-5 . М., «Просвещение» 2009
2. Савельев И.В. Курс общей физики т.1-3, М., «Наука», 2008

### Литература. (дополнительная)

1. В.Н. Рыжов. Физика, ч.1,2,3 Учебное пособие Саратов, «Научная книга», 2006
2. Яворский Б.М., Дятлов А.А., Милковская Л.В. Курс общей физики. т.1-3. М., «Просвещение», 2009
3. Гершензон Е.М. Малов Н.Н. Курс общей физики. М., «Наука», 2007.