

# РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ



Методические указания  
к лабораторным работам  
физического практикума  
в курсе общей физики

Часть 1

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Томский государственный педагогический университет»  
(ТГПУ)

## **РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ**

Методические указания  
к лабораторным работам физического практикума  
в курсе общей физики  
Часть 1

Томск 2024

УДК 372.853, 530.1  
ББК 22.3я73  
Р39

Рекомендовано к изданию  
редакционно-издательским советом  
Томского государственного  
педагогического университета

**Рецензент:**

доктор физико-математических наук, профессор  
Томского государственного педагогического университета  
*В.Я. Энн*

- Р39** **Рентгеновское излучение** : методические указания к лабораторным работам физического практикума в курсе общей физики. Часть 1 / А.Р. Аржаник, С.Г. Катаев, Е.О. Смирнова, А.И. Штак. – Томск : Издательство Томского государственного педагогического университета, 2024. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 2 Мб). – Загл. с титул. экрана. – URL: <http://fulltext.tspu.edu.ru/OA/m2024-2.pdf> – Режим доступа: свободный.

В методических указаниях представлены описания и методика выполнения первой части работ физического практикума по исследованию свойств рентгеновского излучения в рамках курса общей физики в разделе «Атомная и ядерная физика».

Адресованы преподавателям и студентам физико-математических факультетов педагогических университетов.

УДК 372.853, 530.1  
ББК 22.3я73

## Содержание

<b>Предисловие</b> .....	4
<b>Теория</b> .....	5
Тормозное излучение .....	5
Рентгеновское излучение .....	6
Свойства рентгеновского излучения.....	7
Механизм образования и спектры тормозного и характеристического излучений .....	7
Получение рентгеновского излучения. Рентгеновская трубка .....	8
Синхротронное излучение: его свойства и получение .....	12
Применение синхротронного излучения .....	15
<b>Лабораторный практикум</b> .....	16
Правила техники безопасности .....	16
Лабораторная работа № 1 .....	17
Лабораторная работа № 2 .....	21
<b>Вопросы для самоконтроля</b> .....	30
<b>Литература</b> .....	31

## Предисловие

Цель данных методических указаний – оказать помощь студентам при выполнении лабораторных работ по исследованию свойств рентгеновского излучения в рамках курса общей физики.

Лабораторные работы проводятся на реальном физическом оборудовании – рентгеновской установке RHYWE X-Ray 4.0 со съемными рентгеновскими трубками с медным и молибденовым катодами, что отличает их от аналогичных виртуальных компьютерных работ и повышает достоверность полученных в ходе выполнения экспериментальных данных.

Методические указания включают в себя теоретическую часть, описание работ лабораторного практикума, список вопросов для самоконтроля и список литературы.

Перед началом выполнения работ рекомендуется изучить теоретическую часть, затем ответить на вопросы для самоконтроля и только после усвоения теоретической части приступать к выполнению экспериментальной части работ. Для более глубокого изучения теории в конце методических указаний предлагается список учебных пособий.

# Теория

## Тормозное излучение

Существование электромагнитного излучения от *любых, движущихся с ускорением* заряженных частиц, как релятивистских, так и нерелятивистских, следовало уже из уравнений классической электродинамики, опубликованных Дж.К. Максвеллом во второй половине XIX в.

Тормозным обычно называют излучение, возникающее при пролете одной заряженной частицы мимо другой (столкновении двух частиц), если налетающая частица после соударения остается свободной – не захватывается второй частицей.

При движении заряженной частицы в веществе происходит её рассеяние в электростатических полях атомных ядер и электронов. При этом возникает *тормозное излучение*, энергия которого пропорционально квадрату ускорения  $a$  частицы:

$$E = 2e^2 a^2 / 3c^2, \quad (1)$$

где  $E$  – энергия, излучаемая зарядом;  $e, c$  – скорость света.

Таким образом, любые поля, способные создать ускоренное движение заряженных частиц, приводят к появлению *тормозного излучения*. Тормозное излучение, как правило, возникает при движении электронов в среде. Оно лежит в основе рентгеновского излучения рентгеновских аппаратов и  $\gamma$ -излучения, испускаемого быстрыми электронами при прохождении через вещество. Из уравнения (1) следует, что ускорение обратно пропорционально массе частицы, поэтому интенсивность тормозного излучения электрона будет в тысячи раз больше тормозного излучения протона. Можно показать, что число тормозных фотонов, обладающих энергией между  $\hbar\omega$  и  $\hbar(\omega+d\omega)$ , испущенных электроном, движущимся в поле ядра с зарядом  $Ze$ , пропорционально  $Z^2/\omega$  (рис. 1).

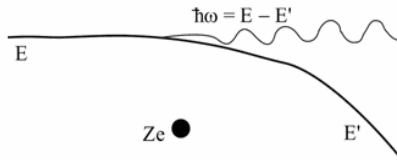


Рис. 1. Тормозное излучение электрона в кулоновском поле ядра с зарядом  $Ze$

При столкновениях частиц с существенно различной массой (например, электрона и иона), более тяжелую частицу можно считать неподвижной. Тогда тормозное излучение возникает за счет потери энергии электрона. Энергия испускаемого кванта  $h\omega$  не может превышать начальную кинетическую энергию электрона  $\varepsilon_{kin} = \frac{mv^2}{2}$ . Это ограничивает широкий спектр тормозного излучения максимальной частотой  $\omega_{max}$ :

$$\omega \leq \omega_{max} = \frac{\varepsilon_{kin}}{h}. \quad (2)$$

При этом количество передаваемой иону энергии электроном может меняться от нуля до  $\varepsilon_{kin}$ , и именно этот случайный характер потери энергии налетающего электрона на ион плюс каскадный характер процесса объясняют образование радиоактивного излучения различных длин волн при торможении большого числа электронов.

## Рентгеновское излучение

Рентгеновское излучение, открытое в 1895 г. немецким физиком В.К. Рентгеном, представляет собой электромагнитные волны коротковолнового диапазона (рис. 2). Длина волны рентгеновского излучения  $\lambda$  лежит в пределах от тысячных долей нанометра до нескольких нанометров. Напомним:  $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ;  $1 \text{ ангстрем} = 10^{-10} \text{ м}$ .



Рис. 2. Шкала электромагнитных волн

## Свойства рентгеновского излучения

Рентгеновское излучение – один из видов ионизирующего излучения электромагнитной природы, и на лучи, способные проходить сквозь непрозрачные вещества, сразу обратили внимание не только физики, инженеры, но и врачи. Физиков привлекла возможность использовать рентгеновское излучение для изучения структуры кристаллических веществ, врачей – выявлять изменения строения внутренних органов человеческого тела, которые ранее можно было обнаружить лишь при вскрытии, инженеров – для целей дефектоскопии. В промышленности рентгеновское излучение применяется для осуществления неразрушающего контроля, а в научных исследованиях – в радиобиологических экспериментах, рентгеноструктурном и рентгеноспектральном анализе. В соответствии с характером применения рентгеновских лучей можно выделить *рентгеноструктурный анализ, рентгеноспектральный анализ и рентгеновскую дефектоскопию.*

### Механизм образования и спектры тормозного и характеристического излучений

*Тормозное рентгеновское излучение* – излучение, которое образуется при торможении быстрых электронов, покинувших катод, атомарным электрическим полем анода. Согласно теории Максвелла, движущиеся заряженные частицы создают вокруг себя электрическое и магнитное поля. Изменение скорости частицы приводит к возникновению цепочки взаимосвязанных изменений электрического и магнитного полей, т.е. порождается электромагнитная волна. С точки зрения закона сохранения энергии при тормозном излучении уменьшающаяся кинетическая энергия электронов переходит в энергию электромагнитного излучения, а также внутреннюю энергию атомов анода, вызывая его нагревание:

$$eU = h\nu + Q, \quad (3)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $U$  – напряжение между катодом и анодом;  $Q$  – выделяющееся на аноде тепло;  $eU$  – энергия ускоренного электрона.



Соотношение между слагаемыми случайно, следовательно, при торможении большого числа электронов образуется радиоактивное излучение различных длин волн, т.е. **спектр тормозного радиоактивного излучения непрерывный** (сплошной). Этот спектр имеет четкую границу со стороны коротких волн, так как энергия фотона радиоактивного излучения меньше энергии ускоренного электрона. Определить эту границу можно из условия перехода всей энергии электрона в энергию фотона ( $Q = 0$ ):

$$eU = h\nu_{max} = \frac{hc}{\lambda_{min}}, \quad \nu_{max} = \frac{eU}{h}, \quad \lambda_{min} = \frac{hc}{eU}. \quad (4)$$

Или, подставив значения констант и измеряя  $U$  в вольтах, получим длину волны в ангстремах:

$$\lambda_{min} = \frac{12390}{U}. \quad (5)$$

## Получение рентгеновского излучения. Рентгеновская трубка

Рентгеновская трубка позволяет генерировать рентгеновское излучение с непрерывным распределением энергии в результате столкновения высокоэнергетических электронов, вылетающих из катода с металлическим анодом (тормозное излучение) (рис. 3).

Энергетические спектры оптического диапазона являются индивидуальными для каждого конкретного элемента. Это связано с тем, что изменение количества электронов во внешней атомной оболочке за счет электрон-электронного взаимодействия кардинальным образом сказывается на энергетическом спектре системы оптической и ультрафиолетовой областях, поскольку переходы электронов между этими уровнями сопровождаются излучением фотонов именно этой части спектра. В то же время внутренние атомные электроны находятся, прежде всего, в потенциале, создаваемом атомным ядром, который лишь частично экранируется электронной оболочкой. Поэтому

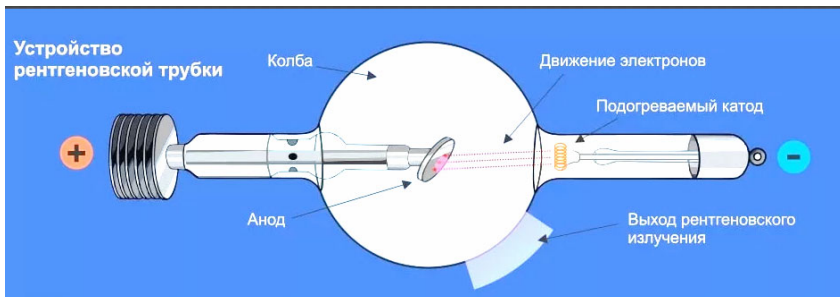


Рис. 3. Вид современных рентгеновских трубок (верхний фрагмент) и устройство рентгеновской трубки (нижний фрагмент)

рентгеновские спектры различных элементов похожи друг на друга и их энергия плавно меняется с изменением заряда ядра, однако качественных перестройки спектра не происходит. На самом деле электроны, находящиеся на внутренних атомных оболочках, «чувствуют», прежде всего, кулоновский потенциал атомного ядра  $-Ze/r^2$ , и их волновые функции и положение энергетических уровней являются водородоподобными. Обычно для описания энергетического спектра внутренних атомных электронов используют приближение эффективного заряда:

$$E_{nl} = -\frac{Ry}{n_2} Z_{\text{eff}}^2 = -\frac{Ry}{n_2} (Z - \sigma_{nl})^2. \quad (6)$$

Здесь  $n$  и  $l$  – главное и орбитальное квантовые числа атомного электрона, находящегося на внутренней оболочке,  $\sigma_{nl}$  – постоянная экранирования. Например, для электрона, находящегося на  $K$ -оболочке,  $\sigma_{1s} \approx 1$ , что означает частичную экранировку поля ядра другим электроном, находящимся на  $K$ -оболочке. При переходе к оболочкам, со-

ответствующим большим значениям главного квантового числа ( $L$ -,  $M$ -оболочки), величина постоянной экранирования возрастает за счет увеличения числа внутренних электронов, причем тем сильнее, чем больше значение орбитального момента рассматриваемого электрона. Таким образом, если был удален один из электронов, находящийся на самой ближней к ядру  $K$ -оболочке многоэлектронного атома, то оказываются возможными переходы на  $K$ -оболочку с более высоких  $L$ -,  $M$ - атомных оболочек. При этом возникает  $K$ -серия рентгеновского излучения. Соответственно, при переходе электронов с  $M$ -оболочки на  $L$ - появляется  $L$ -серия рентгеновского излучения и т.д. (рис. 4). Такие переходы образуют набор дискретных линий, характерный для каждого элемента.

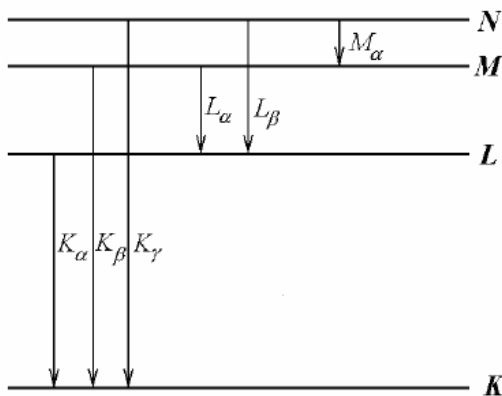


Рис. 4. Серии характеристического рентгеновского излучения атомов

Иными словами, если атом материала анода ионизируется на  $K$ -оболочке после электронного удара, то электрон с любой более высокой оболочки может занять свободное место, испуская квант рентгеновского излучения. Энергия этого рентгеновского кванта соответствует разности энергий двух оболочек, участвующих в этом процессе. Поскольку эта разность энергий зависит от атома, результирующее излучение также называют *характеристическим излучением*.

На вид спектра оказывает влияние величина *напряжения* на трубке между анодом и катодом.

Увеличение напряжения на трубке вызовет два эффекта:

– возрастет скорость и энергия электрона, следовательно, увеличится число квантов тормозного излучения, что приведет к изменению спектральных свойств излучения: коротковолновая граница сместится в область меньших длин волн;

– увеличится число электронов, испущенных катодом, которые достигнут анода, следовательно, произойдет возрастание потока энергии тормозного излучения.

Увеличение температуры накала катода вызовет увеличение эмиссии электронов, следовательно, увеличится поток излучения без изменения спектрального состава. Схема возникновения характеристического рентгеновского излучения представлена на рис. 5.

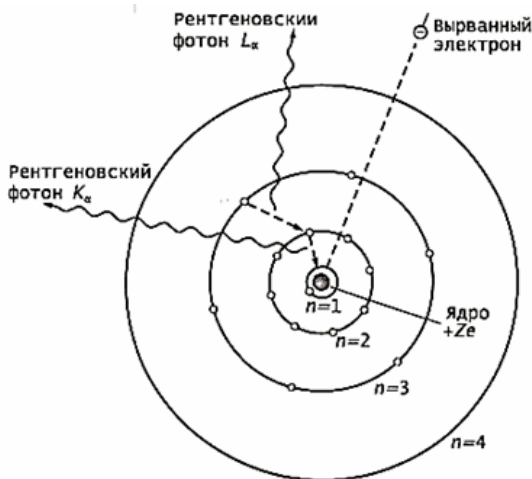


Рис. 5. Образование рентгеновского фотона

Высокоэнергетический электрон способен проникнуть во внутреннюю область атома анода, преодолевая отталкивание поля атомарных электронов, и выбить электрон, находящийся на одной из оболочек внутреннего слоя. На место выбитого электрона обязательно переходит электрон из более удаленного от ядра слоя. Так как энергия внешних электронов больше, чем энергия внутренних электронов, то избыток энергии высвечивается в виде кванта электромагнитного излучения.

Таким образом, спектр тормозного излучения является сплошным, непрерывным, на который наложен набор дискретных линий. На рис. 6 представлена структура типичного рентгеновского спектра.

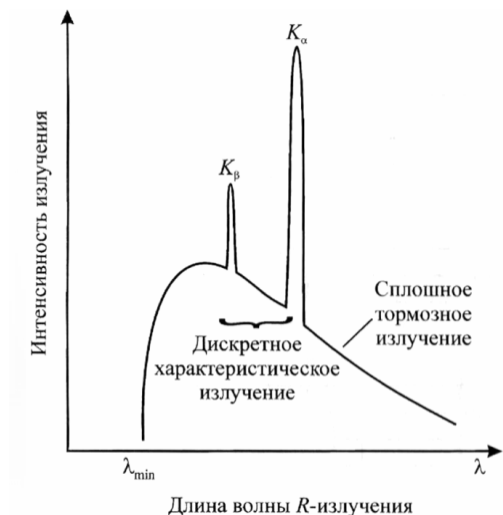


Рис. 6. Структура типичного рентгеновского спектра

## Синхротронное излучение: его свойства и получение

*Синхротронное излучение* (СИ) — это электромагнитное излучение, испускаемое *релятивистскими* зараженными частицами, когда постоянное магнитное поле заставляет их двигаться по круговым орбитам. Поскольку в этом варианте ускорение частиц меняется не электрическим, а магнитным полем, такое излучение можно назвать *магнитотормозным*. Возможность получения СИ и его основные свойства были теоретически предсказаны еще в конце XIX столетия. То есть, в отличие от обычных рентгеновских лучей, случайно обнаруженных В.К. Рентгеном, синхротронное излучение было рассчитано из основных физических принципов.

Существование электромагнитного излучения от движущихся с ускорением заряженных частиц, как уже отмечалось выше, следовало

уже из уравнений классической электродинамики, опубликованных Дж.К. Максвеллом во второй половине XIX в. Основателем же теории синхротронного излучения считается английский физик Дж.А. Шотт, который в 1912 г. описал поляризационные свойства и угловое распределение электромагнитного излучения электрона на круговой орбите, теоретически предсказанного А.-М. Лиенаром еще в 1898 г. Наблюдать это излучение экспериментально удалось только через 35 лет, СИ было обнаружено в 1947 г. почти случайно американским физиком Ф. Хабером при проведении профилактических работ на синхротроне с энергией 70 МэВ. При запуске ускорителя исследователи увидели яркий голубоватый свет, идущий от орбиты электронов. Поскольку экспериментально излучение впервые было обнаружено на синхротроне, его и назвали *синхротронным*. Такое излучение создается не только в экспериментальных установках – синхротронах, но может возникать во Вселенной, где проявляется, например, в радиогалактиках, пульсарах, квазарах, взрывах сверхновых звезд.

История с СИ является ярким примером того, как развитие фундаментальной теоретической физики опережает и стимулирует технический прогресс.

Из уравнений Максвелла следует, что электромагнитное излучение излучается любыми ускоренно движущимися заряженными частицами, как релятивистскими, так и нерелятивистскими. Так, электромагнитное излучение *релятивистских* частиц, движущихся в *переменных* электрических и магнитных полях, называется *ондуляторным излучением*, а нерелятивистские заряженные частицы порождают фотоны, в том числе и рентгеновского диапазона, движущиеся по круговым или спиральным траекториям. Такое излучение называется *циклотронным излучением*. Его отличие от синхротронного состоит в том, что оно излучается сравнительно медленными частицами, и потому, подобно тормозному излучению рентгеновской трубки, испускается во все стороны от излучающей частицы (рис. 7, а). Релятивистские же электроны (или позитроны) в синхротроне, в соответствии с законами релятивистской механики, излучают фотоны узким пучком в направлении движения (*прожекторный эффект*, рис. 7, б). Поэтому интенсивность *синхротронного излучения* значительно выше *циклотронного*.

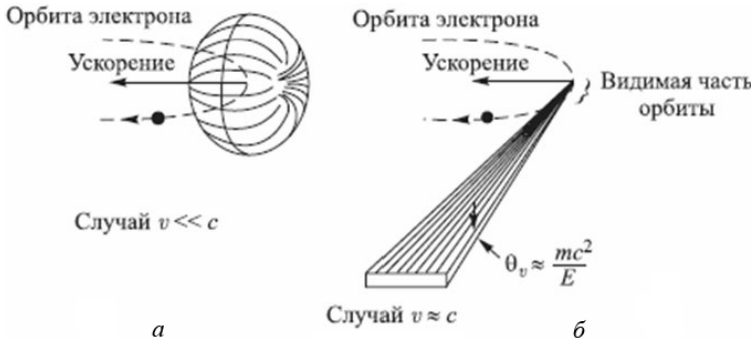


Рис. 7. Пространственное распределение фотонного излучения нерелятивистских  $v \ll c$  (циклотронное излучение) и релятивистских  $v \approx c$  электронов (синхротронное излучение),  $\theta_v$  – угол вертикальной расходимости пучка СИ

Для *нерелятивистской* заряженной частицы с массой  $m$  и зарядом  $q$ , движущейся в постоянном поле с магнитной индукцией  $B$  со скоростью  $v \ll c$  перпендикулярно вектору индукции, радиус круговой траектории можно легко определить по закону Ньютона из равенства центростремительной силы Лоренца, создаваемой магнитным полем, и центробежной силы. Получается, что эта частица должна двигаться по окружности радиуса

$$R = \frac{mv}{qB} \quad (7)$$

и вращаться по этой круговой орбите с циклической частотой  $\omega_c = \frac{qB}{m}$ , которая не зависит от скорости частицы, а определяется индукцией магнитного поля, зарядом и массой частицы. Поведение такой частицы описывается моделью гармонического осциллятора, излучающего электромагнитные волны с частотой, равной частоте  $\omega_c$  и частотами  $n\omega_c$ , кратными ей, т.е. на основной гиромангнитной частоте и на ее первых гармониках. Эти волны распространяются во все стороны со скоростью света, что представляет типичный случай *циклотронного* излучения. При этом максимум интенсивности излучения приходится на основную частоту  $\omega_c$ , а распределение интенсивности

излучения в пространстве зависит как  $\sin^2\alpha$  от угла  $\alpha$ , между направлением излучения и направлением ускорения излучающей частицы (рис. 7, а). Здесь наблюдается прямая аналогия с электромагнитным излучением, например, в радио или телевизионных антеннах, где колебание электрических зарядов по антенне происходит с характерной для данной радиостанции несущей частотой. Функция распределения интенсивности циклотронного излучения  $I \sim \sin^2\alpha$ , где  $\alpha$  – угол между вектором ускорения и направлением излучения, графически изображается поверхностью тороида, осью которого является вектор центростремительного ускорения.

### **Применение синхротронного излучения**

Во всем диапазоне фотонов с энергией от  $10^{-2}$  до  $10^6$  эВ (от ИК-области до  $\gamma$ -излучения) СИ является самым мощным источником из всех существующих. Были созданы специализированные источники СИ, которые являются инфраструктурой для развития самых разных наук – физики, материаловедения, химии, катализа, биологии, археологии, геологии. Все это базируется сейчас на мощных источниках СИ.



## Лабораторный практикум

### Правила техники безопасности

1. Запускать рентгеновский аппарат имеет право только обученный и квалифицированный персонал в соответствии с правилами и положениями, действующими в ТГПУ.

2. Необходимо соблюдать требования сертификата. Оператор должен убедиться, что рентгеновская установка защищена от доступа посторонних лиц; не используется дольше, чем это необходимо. Лица, работающие с рентгеновской установкой, не должны находиться в непосредственной близости от установки дольше, чем это необходимо.

3. Выключите устройство после его использования. Непрерывная работа недопустима. Максимальное время работы в день – 10 ч.

4. Не подключайте к устройству никакие устройства, кроме тех, которые предназначены для этой цели.

5. **Внимание:** отключите устройство от источника питания перед заменой или удалением любого из кабелей!

6. Используйте устройство исключительно по прямому назначению.

7. Использование устройства запрещено, если:

– повреждена раздвижная дверь из свинца, содержащего акрилового стекла, через которую открывается экспериментальная камера, или другие защитные стеклянные окна, которые используются для наблюдения за рентгеновским аппаратом и экспериментальной камерой;

– вентилятор со стороны подключения рентгеновского аппарата внутри аппарата не работает (акустическая проверка);

– цепи безопасности для прерывания работы рентгеновского аппарата при открытии раздвижной дверцы не работают должным образом.

### Инструкция по эксплуатации

1. Устройство должно использоваться под наблюдением специалиста и в электромагнитно-контролируемой среде в исследовательских, учебных и учебных заведениях (школы, университеты, лаборатории, институты).

2. Электростатические заряды или аналогичные электромагнитные явления (высокие частоты, всплески, непрямой разряд молнии и т.д.) могут повлиять на устройство, так что оно не будет работать в указанном диапазоне данных. Не используйте радиопередатчики (радиоприемники, мобильные телефоны) в непосредственной близости от установки.

## Лабораторная работа № 1

### Рентгенографические исследования объектов

**Цель работы:** пронаблюдать проникновение рентгеновских лучей в мягкую материю.

**Задачи:**

– сделать рентгеновский снимок объекта и зафиксировать результат на флуоресцентном экране;

– визуально сравнить результат при изменении анодного тока и напряжения на рентгеновской трубке.

**Оборудование:** рентгеновская установка PHYWE X-Ray 4.0 (рис. 8), съемная рентгеновская трубка Cu, набор образцов, флуоресцентный экран.

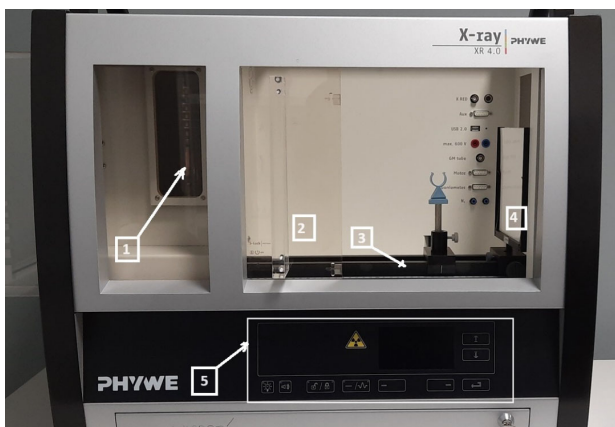


Рис. 8. Рентгеновская установка PHYWE X-Ray 4.0:

- 1 – рентгеновская трубка; 2 – защитная дверка установки; 3 – оптическая скамья;  
4 – флуоресцентный экран; 5 – панель управления параметрами установки

## Общая информация

Большинство применений рентгеновских лучей основано на их способности проходить сквозь вещество. Поскольку эта способность зависит от плотности вещества, становится возможным получение изображений внутренних частей объектов и даже людей. Это находит широкое применение в таких областях, как медицина или безопасность.

Принцип работы заключается в том, что рентгеновская трубка излучает рентгеновские лучи, которые подсвечивают флуоресцентный экран. Объекты, расположенные между источником рентгеновского излучения и флуоресцентным экраном, облучаются таким образом, что становится видимой их внутренняя структура. Изменение анодного тока и напряжения приводит к изменению интенсивности, что можно качественно наблюдать на флуоресцентном экране.

## Теория

Рентгеновские лучи невидимы для человеческого глаза. Чтобы их можно было воспринимать визуально, используется процедура их преобразования в видимый свет с помощью флуоресценции и определенных материалов. Эти материалы поглощают рентгеновское излучение и переходят в возбужденное состояние. Когда они возвращаются в основное состояние, то частично излучают полученную энергию, но в диапазоне более длинных волн, которые теперь находятся в видимом диапазоне. В настоящее время в качестве люминесцентного вещества на экране используется в основном сульфид цинка. Величина поглощенной энергии зависит от толщины и типа материала.

Когда рентгеновские лучи с интенсивностью  $I_0$  попадают в вещество толщиной  $d$ , интенсивность  $I$  проходящего излучения в соответствии с законом поглощения имеет следующий вид:

$$I = I_0 \exp(-\mu(\lambda, Z) \cdot d), \quad (8)$$

где  $I$  – интенсивность излучения за поглотителем;  $I_0$  – начальная интенсивность излучения;  $\mu(z, l)$  – линейный коэффициент поглощения;  $d$  – толщина материала.

Уравнение (8) показывает, что интенсивность излучения за поглотителем зависит не только от толщины поглотителя, но и от длины волны  $\lambda$  и атомного номера  $Z$  поглощающего вещества.

### Ход работы

1. Если в экспериментальной камере установлен гониометр, его следует по возможности снять.

2. Установите оптическую скамью 3 (см. рис. 8) и расположите флуоресцентный экран 4 в держателе на оптической скамье 3 как можно дальше вправо. Для устойчивого расположения различных объектов перед флуоресцентным экраном рекомендуется использовать предметные столики.

**Задание 1.** Сделать рентгеновский снимок объекта и наблюдать результат на флуоресцентном экране.

### Последовательность работы

1. Получите у преподавателя набор образцов для рентгеноскопии.

2. Расположите один из образцов (объектов) непосредственно перед флуоресцентным экраном или на некотором расстоянии от него, прямо на пути луча. При увеличении расстояния от объекта до экрана, изображение объекта также увеличится, но при этом станет менее контрастным. Вы получите высококонтрастное изображение при максимальном анодном напряжении (35 кВ) и максимальном анодном токе (1,0 мА).

3. Закройте дверь установки 2 (см. рис. 8) и действуйте следующим образом:

– заблокируйте дверь с помощью кнопки блокировки двери 2 (*разблокировать/заблокировать дверь*) (рис. 9).

– выключите свет в кабинете, а также выключите свет с помощью кнопки 1 (рис. 9).

– активируйте рентгеновское излучение с помощью кнопки 3 (*выключить/включить рентгеновскую трубку*) (рис. 9).

4. Сделайте снимок изображения на флуоресцентном экране с выдержкой на цифровую камеру или камеру телефона (аппарат должен быть расположен статично).

5. Включите освещение в камере, выключите рентгеновскую трубку, разблокируйте дверь камеры.

6. Получите изображения других объектов, повторив порядок действий 2–5, указанных выше.

**Примечание.** Для демонстрации действия рентгеновских лучей можно использовать широкий спектр различных объектов. Особенно впечатляющие результаты могут быть достигнуты с объектами, состоящими из нескольких различных материалов с разной поглощающей способностью либо с объектами с различной толщиной материала.

**Задание 2.** Изменяйте анодный ток и напряжение и наблюдайте результат на флуоресцентном экране.

Когда анодный ток уменьшается, изображение становится темнее. То же самое происходит при уменьшении анодного напряжения.

**Регулировка анодного напряжения и тока:**

- Нажмите кнопку 6 (рис. 9) под «**Меню**» (дисплей).
- В следующем окне выберите «**Параметры рентгеновского снимка**» (используйте клавиши 6 (рис. 9) со стрелками для выбора).
- Выберите параметр, который необходимо изменить.
- Подтвердите свой выбор нажатием **Enter**.

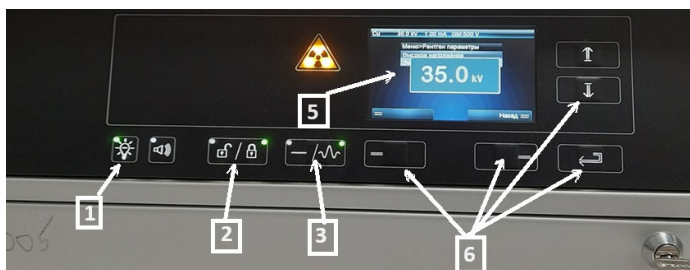


Рис. 9. Панель управления рентгеновской установкой: 1 – включение/выключение освещения рабочей камеры; 2 – блокировка/разблокировка защитной двери; 3 – включение/выключение рентгеновской трубки; 5 – дисплей; 6 – кнопки управления дисплеем

- Измените текущее значение напряжения, которое отображается с помощью клавиш со стрелками.
- Подтвердите нажатием **Enter**.

- Теперь будут отображены новые параметры.
- Сделайте снимок с выдержкой на цифровую камеру или камеру телефона (аппарат должен быть расположен статично).

**Сделайте вывод о проделанной работе.**

## **Лабораторная работа № 2**

### **Характеристическое рентгеновское излучение меди (молибдена)**

**Цель работы:** исследовать характеристическое рентгеновское излучение меди (молибдена).

#### **Задачи:**

– проанализировать интенсивность рентгеновского излучения меди (молибдена) в зависимости от угла Брэгга с помощью монокристалла LiF и KBr;

– определить значение энергий характеристических рентгеновских лучей меди (молибдена) и сравнить их со значениями, которые были определены на основе соответствующей диаграммы энергетических уровней;

– вычислить значение средней длины волны для каждой характеристической линии.

**Оборудование:** рентгеновская установка RHYWE X-Ray 4.0, съемная рентгеновская трубка Cu (Mo), гониометр, счетчик Гейгера, компьютер, монокристаллы KBr и LiF, диафрагмы.

### **Общая информация**

Рентгеновское излучение, открытое В.К. Рентгеном в 1895 г., представляет собой электромагнитные волны с длиной волны от  $10^{-3}$  до  $10^2$  нм. В настоящее время широко используется во многих отраслях в качестве одного из основных методов неразрушающего контроля.

Лабораторным источником рентгеновского излучения является рентгеновская трубка, причем возможно наблюдение и характеристического излучения материала, из которого изготовлен анод.

## Теория

Когда электроны с высоким уровнем кинетической энергии, вылетающие из катода, сталкиваются с металлическим анодом рентгеновской трубки, возникает рентгеновское излучение с непрерывным распределением энергии (тормозное излучение). На спектр тормозного излучения накладываются дискретные линии. Если атом материала анода ионизируется на К-оболочке после электронного удара, то электрон с более высокой оболочки может занять свободное место, испуская квант рентгеновского излучения. Энергия этого рентгеновского кванта соответствует разности энергий двух оболочек, участвующих в этом процессе. Поскольку эта разность энергий зависит от атома, результирующее излучение также называют характеристическим излучением.

Характеристическое излучение, возникающее при переходе от оболочки L к оболочке K, называется  $K_{\alpha}$ , а излучение, возникающее при переходе от оболочки M к оболочке K, –  $K_{\beta}$ . Переходы  $M_1-K$ ,  $L_1-K$  не разрешены из-за квантово-механических правил отбора).  $\Delta l = \pm 1$ ,  $\Delta j = \pm 1$  правила для дипольного излучения,  $l$  – орбитальный угловой момент,  $j$  – полный угловой момент) (рис. 10):

$$E_{K_{\alpha^*}} = E_K - \frac{1}{2}(E_{L_2} + E_{L_3}) = 8,038 \text{ кэВ},$$

$$E_{K_{\beta}} = E_K - E_{M_{2,3}} = 8,905 \text{ кэВ},$$

$E_{K_{\alpha^*}}$  – среднее значение энергии  $K_{\alpha_1}$  и  $K_{\alpha_2}$ -линий.

Для анализа полихроматических лучей можно выбирать разные монокристаллы. В данной лабораторной работе имеется два варианта: щелочно-галогидные кристаллы LiF и KBr.

Когда рентгеновские лучи с длиной волны  $\lambda$  попадают на плоскость решетки под углом скольжения  $\vartheta$ , лучи, отраженные от плоскости решетки, интерферируют конструктивно друг с другом и формируют максимум при условии, что их разность хода  $\Delta$  соответствует целому кратному числу длины волны.

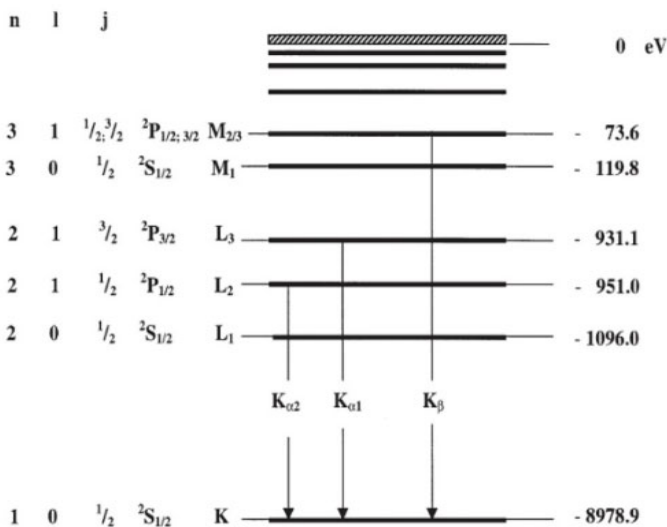


Рис. 10. Диаграмма уровней энергии меди. Характеристические рентгеновские линии меди (Информация была взята из "Handbook of Chemistry and Physics", CRC Press Inc., Florida)

В соответствии с обозначениями на рис. 11, закон Вульфа–Брэгга запишется в виде

$$2d \sin \vartheta = n\lambda, \quad (9)$$

где  $d$  – расстояние между плоскостями,  $n = 1, 2, 3 \dots$  порядок отражения,  $\lambda$  – длина волны.

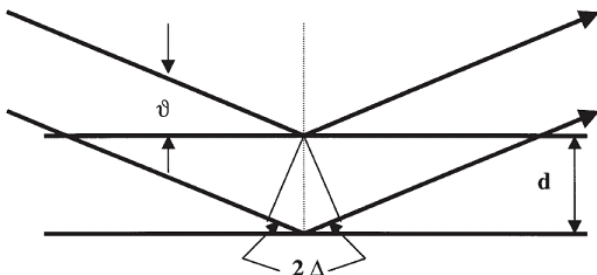


Рис. 11. Брэгговское рассеяние на паре плоскостей решетки



Из формулы Вульфа–Брэгга следует, что измеряя экспериментально углы  $\vartheta$  дифракционных максимумов, можно:

1) определять межплоскостные расстояния, если известны длины волн  $\lambda$ , отвечающие дифракционным максимумам;

2) определять длину волн, отвечающих этим максимумам, при условии, что известно межплоскостное расстояние  $d$ ; при этом энергия рентгеновского излучения будет определяться соотношением

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}. \quad (10)$$

Или, подставляя выражение для длины волны из (9) в (10), получим

$$E = \frac{nhc}{2d \sin \vartheta}. \quad (11)$$

Значения констант:

$$h = 6,6256 \times 10^{-34} \text{ дж} \times \text{с}; \quad c = 2,9979 \times 10^8 \text{ м/с}.$$

Межплоскостное расстояние  $LiF$   $d = 2,014 \times 10^{-10}$  м,  $d = 2,014 \times 10^{-10}$  м, для  $KBr$   $d = 3,290 \times 10^{-10}$  м,  $1 \text{ эВ} = 1,6021 \times 10^{-19}$  дж.

## Подготовка к работе

Блок гониометра (рис. 12) должен располагаться рабочей камере установки в крайнем положении с правой стороны.



Рис. 12. Гониометр

Закрепите трубку счетчика Гейгера–Мюллера 4 с держателем на заднем упоре направляющих гониометра (рис. 13). Не забудьте установить перед счетчиком диафрагму 1.

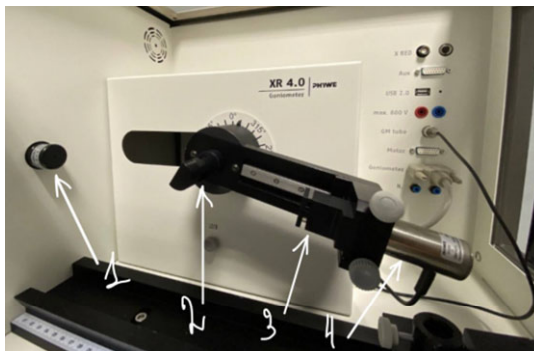


Рис. 13. Элементы установки для проведения измерений: 1 – диафрагма, 2 – монокристалл, 3 – диафрагма, 4 – счетчик Гейгера.  
Элементы 2–4 устанавливаются на гониометре

Вставьте диафрагменную трубку 3 диаметром 2 мм в выходное отверстие блока подключения трубки.

### Ход работы

1. На компьютере запустите программу *measure* (рис. 14).



Рис. 14. Часть интерфейса ПО: справа – настройка параметров гониометра, слева – настройка параметров трубки

2. Закройте дверку камеры и введите параметры на компьютере (рис. 15), для каждого монокристалла они разные.

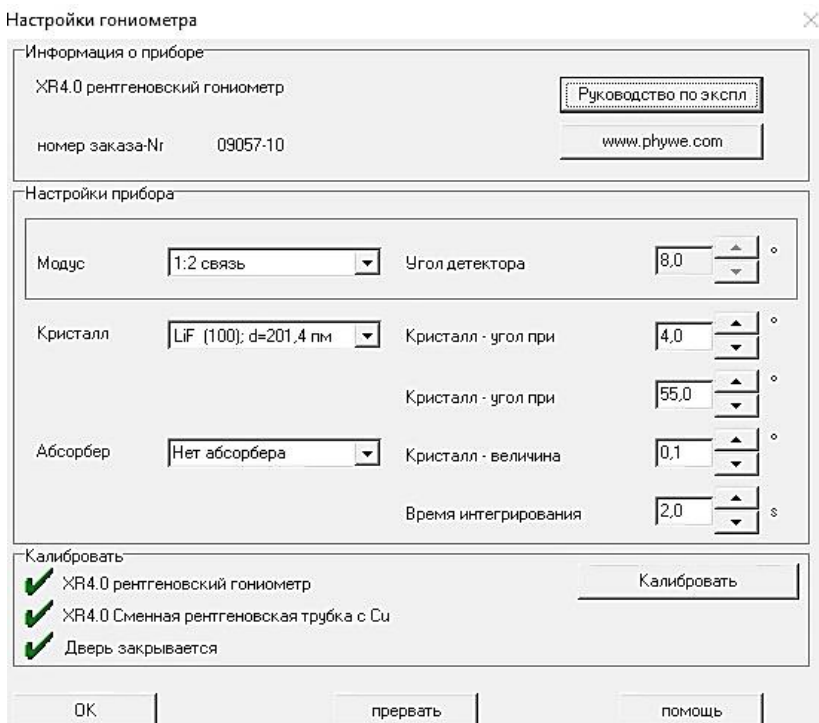


Рис. 15. Окно программы после введения параметров для кристалла LiF

3. После введения параметров откалибруйте установку при помощи компьютера и нажмите на кнопку «**начать измерения**» в программе.

Значения начального и конечного угла для кристалла *LiF* равны 4 и 55° соответственно; для *KBr* эти углы равны 3 и 75°. Шаг измерения 0,1°, время измерения 2 с.

4. Далее нажмите на кнопку «калибровать» и после окончания автоматической калибровки запустите измерения, установка считает все автоматически.

5. После откройте дверцу установки смените кристалл и проделайте аналогичную работу, но уже с другим кристаллом.

**Задание 1.** Проанализируйте интенсивность рентгеновского излучения меди в зависимости от угла Брэгга с помощью монокристаллов LiF и KBr.

На рис. 16 показан рентгеновский спектр меди, полученный с использованием монокристалла LiF. Четкие линии накладываются на непрерывный тормозной спектр.

Углы скольжения этих линий остаются неизменными при изменении анодного напряжения. Это указывает на то, что эти линии являются характеристическими рентгеновскими линиями. Две пары линий можно отнести к интерференции первого и второго порядка ( $n = 1$  и  $n = 2$ ). Если монокристалл LiF заменить на монокристалл KBr, то из-за большего межплоскостного расстояния кристалла может наблюдаться интерференция вплоть до четвертого порядка. В спектре тормозного излучения можно увидеть четкий скачок интенсивности при угле  $8,0^\circ$ . Это соответствует значению поглощения К-края брома ( $E_K = 13,474$  кэВ) при  $n = 1$ , что можно ожидать теоретически. В этой области тормозного спектра невозможно наблюдать поглощение К-края калия, лития и фтора, поскольку интенсивность слишком мала.

**Задание 2.** Определите значения энергии характеристических рентгеновских лучей меди, а также длину волны медного излучения и сравните их со значениями, которые были определены на основе соответствующей диаграммы энергетических уровней.

Для этого вам необходимо заполнить таблицу для каждого монокристалла и с помощью формулы (3) вычислить значение энергий.

Кристалл	$^\circ, \vartheta$	Линия $K\alpha$ или $K\beta$	E, кэВ	Длина волны, $\lambda, \text{Å}$
$n = 1$	...	...	...	...
$n = 2$	...	...	...	...

Далее нужно взять среднее значение энергии и по формуле (2) определить длину волны.

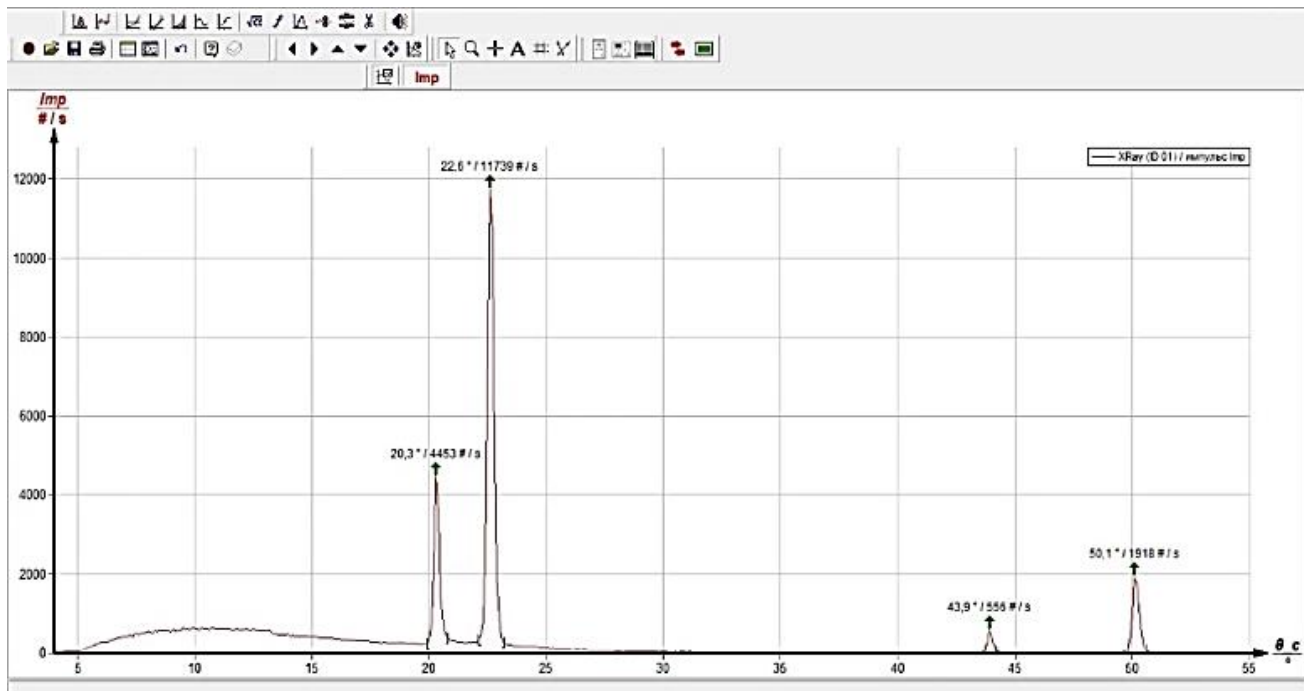




Рис. 16. Рентгеновский спектр меди, полученный с использованием монокристалла LiF

Для справки: табличные значения длины волны можно получить при помощи формулы (9), используя информацию с рис. 10.

**Примечание.** С помощью программного обеспечения *measure* положения пиков в спектре определяются довольно легко:

Нажмите кнопку «**Маркировка**»  и выберите область для определения пика. Нажмите на кнопку «**Анализ пика**» . Появится окно «**Анализ пиков**» (рис. 18). Затем нажмите «**Рассчитать**».

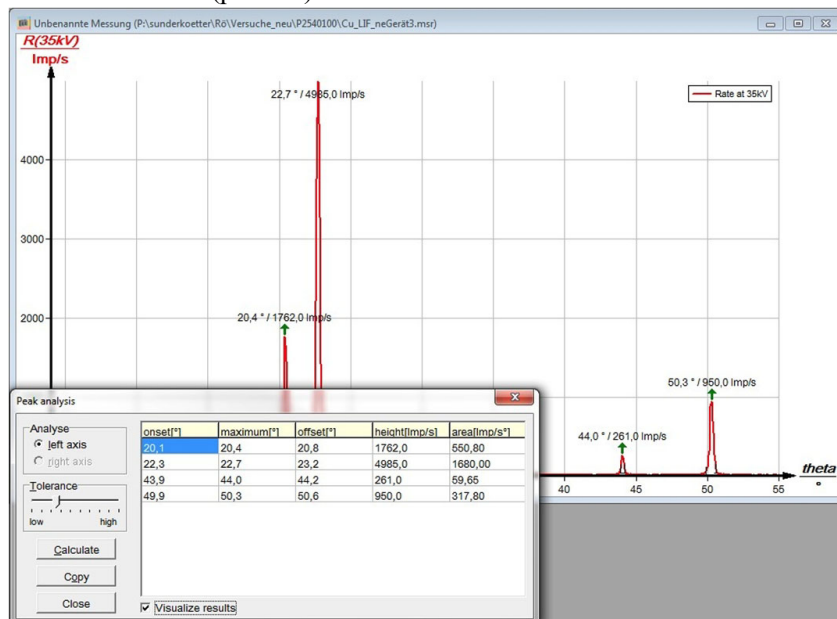


Рис. 18. Автоматический анализ пиков с помощью программы *measure*

Если вычислены не все желаемые пики (или их слишком много), скорректируйте допустимую погрешность соответствующим образом.

## Вопросы для самоконтроля

1. Что такое рентгеновское излучение?
2. Что такое спектр?
3. Какой вид спектра называют сплошным?
4. Какой вид спектра называют характеристическим?
5. Назовите формулу Вульфа–Брегга.
6. Опишите строение рентгеновской трубки.
7. Назовите виды рентгеновских трубок.
8. Перечислите свойства рентгеновского излучения.
9. Опишите механизм возникновения рентгеновского спектра в рентгеновской трубке.
10. Какая серия рентгеновского спектра является К-серией?
11. Почему нельзя получить характеристические рентгеновские лучи с атомом водорода?
12. Каков физический смысл постоянной экранирования?
13. Перечислите экспериментальные методы определения длины волн рентгеновского излучения.

## Литература

1. Кузнецова, Е.В. Рентгенография металлов и сплавов : учебное пособие / Е.В. Кузнецова, О.А. Косинова, И.А. Коваленко, И.А. Цыганов. – Липецк : Издательство Липецкого государственного технического университета, 2019. – 186 с.

2. Сивухин, Д.В. Общий курс физики : учебное пособие : в 5 томах / Д.В. Сивухин. – 3-е изд., стер. – Москва : Физматлит, 2002. – Т. 4. Оптика. – 792 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82981> (дата обращения: 25.11.2023). – ISBN 5-9221-0228-1. – Текст : электронный.

3. Сивухин, Д.В. Общий курс физики : учебное пособие : в 5 томах / Д.В. Сивухин. – 2-е изд., стер. – Москва : Физматлит, 2002. – Т. 5. Атомная и ядерная физика. – 783 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82991> (дата обращения: 25.11.2023). – ISBN 5-9221-0230-3. – Текст : электронный.

4. Фетисов, Г.В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ / Г.В. Фетисов ; под редакцией Л.А. Асланова. – Москва : Физматлит, 2007. – 672 с.



АРЖАНИК Алексей Ремович  
КАТАЕВ Сергей Григорьевич  
СМИРНОВА Екатерина Олеговна  
ШТАК Алена Игоревна

## РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Методические указания  
к лабораторным работам физического практикума  
в курсе общей физики

Часть 1

*Электронное издание сетевого распространения*

Ответственный за выпуск: *Ю.Ю. Афанасьева*

Корректор: *Ю.П. Готфрид*

Технический редактор: *Ю.А. Ворошилова*

Подписано к использованию: 1.02.2024

Гарнитура Times. Объем издания: 2 Мб.

Заказ № 035/эу.

Издательство Томского государственного педагогического университета  
634061, г. Томск, ул. Киевская, 60  
тел. 8(3822)311-484  
E-mail: [izdatel@tspu.edu.ru](mailto:izdatel@tspu.edu.ru)

