

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

**ФГБОУ ВПО «УРАЛЬСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ВЕТЕ-  
РИНАРНОЙ МЕДИЦИНЫ»**

Кафедра физики

# **РЕФЕРАТ**

На тему: «Рентгеновское излучение»

Выполнили студентки 5 курса  
Факультета ветеринарной  
медицины 51, 53 «Б» группы  
Колина Т.Ю., Тямчик О.Е.

г.Троицк – 2015г.

## Содержание:

Введение.....	3
1. Получение рентгеновского излучения.....	4
2. Обнаружение рентгеновского излучения.....	6
3. Рентгеновская и гамма-дефектоскопия.....	7
4. Дифракция рентгеновского излучения.....	8
5. Методы дифракционного анализа.....	11
6. Спектрохимический рентгеновский анализ.....	14
7. Медицинская рентгенодиагностика.....	16
8. Биологическое действие рентгеновского излучения.....	16
9. Опасные факторы рентгеновского излучения.....	17
Заключение.....	18
Список использованных источников.....	19

## Введение

Рентгеновское излучение, невидимое излучение, способное проникать, хотя и в разной степени, во все вещества. Представляет собой электромагнитное излучение с длиной волны порядка 10–8 см.

Как и видимый свет, рентгеновское излучение вызывает почернение фотопленки. Это его свойство имеет важное значение для медицины, промышленности и научных исследований. Проходя сквозь исследуемый объект и падая затем на фотопленку, рентгеновское излучение изображает на ней его внутреннюю структуру. Поскольку проникающая способность рентгеновского излучения различна для разных материалов, менее прозрачные для него части объекта дают более светлые участки на фотоснимке, чем те, через которые излучение проникает хорошо. Так, костные ткани менее прозрачны для рентгеновского излучения, чем ткани, из которых состоит кожа и внутренние органы. Поэтому на рентгенограмме кости обозначаются как более светлые участки и более прозрачное для излучения место перелома может быть достаточно легко обнаружено. Рентгеновская съемка используется также в стоматологии для обнаружения кариеса и абсцессов в корнях зубов, а также в промышленности для обнаружения трещин в литье, пластмассах и резинах.

Рентгеновское излучение используется в химии для анализа соединений и в физике для исследования структуры кристаллов. Пучок рентгеновского излучения, проходя через химическое соединение, вызывает характерное вторичное излучение, спектроскопический анализ которого позволяет химику установить состав соединения. При падении на кристаллическое вещество пучок рентгеновских лучей рассеивается атомами кристалла, давая четкую правильную картину пятен и полос на фотопластинке, позволяющую установить внутреннюю структуру кристалла.

Применение рентгеновского излучения при лечении рака основано на том, что оно убивает раковые клетки. Однако оно может оказать нежелательное влияние и на нормальные клетки. Поэтому при таком использовании рентгеновского излучения должна соблюдаться крайняя осторожность.

Рентгеновское излучение было открыто немецким физиком В.Рентгеном (1845–1923). Его имя увековечено и в некоторых других физических терминах, связанных с этим излучением: рентгеном называется международная единица дозы ионизирующего излучения; снимок, сделанный в рентгеновском аппарате, называется рентгенограммой; область радиологической медицины, в которой используются рентгеновские лучи для диагностики и лечения заболеваний, называется рентгенологией.

Рентген открыл излучение в 1895, будучи профессором физики Вюрцбургского университета. Проводя эксперименты с катодными лучами (потоками электронов в разрядных трубках), он заметил, что расположенный вблизи вакуумной трубки экран, покрытый кристаллическим цианолатинитом бария, ярко светится, хотя сама трубка закрыта черным картоном. Далее Рентген установил, что проникающая способность обнаруженных им неизвестных лучей, которые он назвал X-лучами, зависит от состава поглощающего материала. Он получил также изображение костей собственной руки, поместив ее между разрядной трубкой с катодными лучами и экраном с покрытием из цианолатинита бария. За открытием Рентгена последовали эксперименты других исследователей, обнаруживших много новых свойств и возможностей применения этого излучения. Большой вклад внесли М.Лауэ, В.Фридрих и П.Книппинг, продемонстрировавшие в 1912 дифракцию рентгеновского излучения при прохождении его через кристалл; У.Кулидж, который в 1913 изобрел высоковакуумную рентгеновскую трубку с подогретым катодом; Г.Мозли, установивший в 1913 зависимость между длиной волны излучения и атомным номером элемента; Г. и Л.Брэгги, получившие в 1915 Нобелевскую премию за разработку основ рентгеноструктурного анализа.

## 1. Получение рентгеновского излучения

Рентгеновское излучение возникает при взаимодействии электронов, движущихся с большими скоростями, с веществом. Когда электроны соударяются с атомами какого-либо вещества, они быстро теряют свою кинетическую энергию. При этом большая ее часть переходит в тепло, а небольшая доля, обычно менее 1%, преобразуется в энергию рентгеновского излучения. Эта энергия высвобождается в форме квантов – частиц, называемых фотонами, которые обладают энергией, но масса покоя которых равна нулю. Рентгеновские фотоны различаются своей энергией, обратно пропорциональной их длине волны. При обычном способе получения рентгеновского излучения получают широкий диапазон длин волн, который называют рентгеновским спектром. В спектре присутствуют ярко выраженные компоненты, как это показано на рис. 1.

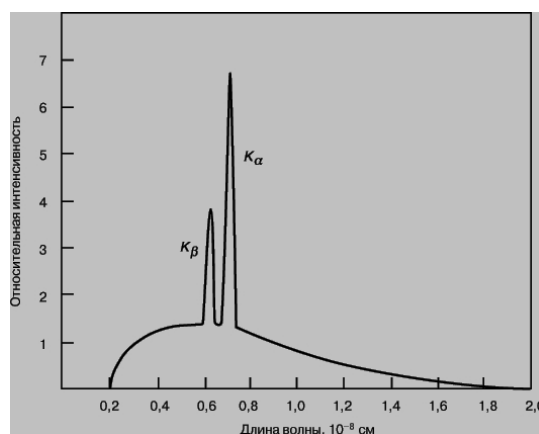


Рис. 1. Обычный рентгеновский спектр

Обычный рентгеновский спектр – состоит из непрерывного спектра (континуума) и характеристических линий (острые пики). Линии  $K_{\alpha}$  и  $K_{\beta}$  возникают вследствие взаимодействий ускоренных электронов с электронами внутренней K-оболочки.

Широкий «континуум» называют непрерывным спектром или белым излучением. Налагающиеся на него острые пики называются характеристическими рентгеновскими линиями испускания. Хотя весь спектр есть результат столкновений электронов с веществом, механизмы возникновения его широкой части и линий разные. Вещество состоит из большого числа атомов, каждый из которых имеет ядро, окруженное электронными оболочками, причем каждый электрон в оболочке атома данного элемента занимает некоторый дискретный уровень энергии. Обычно эти оболочки, или энергетические уровни, обозначают символами K, L, M и т.д., начиная от ближайшей к ядру оболочки. Когда налетающий электрон, обладающий достаточно большой энергией, соударяется с одним из связанных с атомом электронов, он выбивает этот электрон с его оболочки. Опустевшее место занимает другой электрон с оболочки, которой соответствует большая энергия. Этот последний отдает избыток энергии, испуская рентгеновский фотон. Поскольку электроны оболочек имеют дискретные значения энергии, возникающие рентгеновские фотоны тоже обладают дискретным спектром. Этому соответствуют острые пики для определенных длин волн, конкретные значения которых зависят от элемента-мишени. Характеристические линии образуют K-, L- и M-серии, в зависимости от того, с какой оболочки (K, L или M) был удален электрон. Соотношение между длиной волны рентгеновского излучения и атомным номером называется законом Мозли (рис. 2).

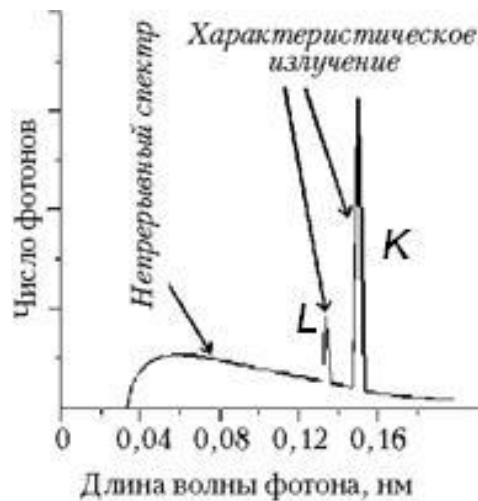


Рис. 2. Длина волны характеристического рентгеновского излучения

Длина волны характеристического рентгеновского излучения, испускаемого химическими элементами, зависит от атомного номера элемента. Кривая соответствует закону Мозли: чем больше атомный номер элемента, тем меньше длина волны характеристической линии.

Если электрон наталкивается на относительно тяжелое ядро, то он тормозится, а его кинетическая энергия выделяется в виде рентгеновского фотона примерно той же энергии. Если же он пролетит мимо ядра, то потеряет лишь часть своей энергии, а остальную будет передавать попадающим на его пути другим атомам. Каждый акт потери энергии ведет к излучению фотона с какой-то энергией. Возникает непрерывный рентгеновский спектр, верхняя граница которого соответствует энергии самого быстрого электрона. Таков механизм образования непрерывного спектра, а максимальная энергия (или минимальная длина волны), фиксирующая границу непрерывного спектра, пропорциональна ускоряющему напряжению, которым определяется скорость налетающих электронов. Спектральные линии характеризуют материал бомбардируемой мишени, а непрерывный спектр определяется энергией электронного пучка и практически не зависит от материала мишени.

Рентгеновское излучение можно получать не только электронной бомбардировкой, но и облучением мишени рентгеновским же излучением от другого источника. В этом случае, однако, большая часть энергии падающего пучка переходит в характеристический рентгеновский спектр и очень малая ее доля приходится на непрерывный. Очевидно, что пучок падающего рентгеновского излучения должен содержать фотоны, энергия которых достаточна для возбуждения характеристических линий бомбардируемого элемента. Высокий процент энергии, приходящейся на характеристический спектр, делает такой способ возбуждения рентгеновского излучения удобным для научных исследований.

**Рентгеновские трубки.** Чтобы получать рентгеновское излучение за счет взаимодействия электронов с веществом, нужно иметь источник электронов, средства их ускорения до больших скоростей и мишень, способную выдерживать электронную бомбардировку и давать рентгеновское излучение нужной интенсивности. Устройство, в котором все это есть, называется рентгеновской трубкой. Ранние исследователи пользовались «глубоко вакуумированными» трубками типа современных газоразрядных. Вакуум в них был не очень высоким.

В газоразрядных трубках содержится небольшое количество газа, и когда на электроды трубки подается большая разность потенциалов, атомы газа превращаются в положительные и отрицательные ионы. Положительные движутся к отрицательному электроду (катоде) и, падая на него, выбивают из него электроны, а они, в свою очередь, движутся к положительному электроду (аноду) и, бомбардируя его, создают поток рентгеновских фотонов. В современной рентгеновской трубке, разработанной Кулиджем (рис. 3), источником элек-

тронов является вольфрамовый катод, нагреваемый до высокой температуры. Электроны ускоряются до больших скоростей высокой разностью потенциалов между анодом (или антикатодом) и катодом. Поскольку электроны должны достичь анода без столкновений с атомами, необходим очень высокий вакуум, для чего нужно хорошо откачать трубку. Этим также снижаются вероятность ионизации оставшихся атомов газа и обусловленные ею побочные токи.

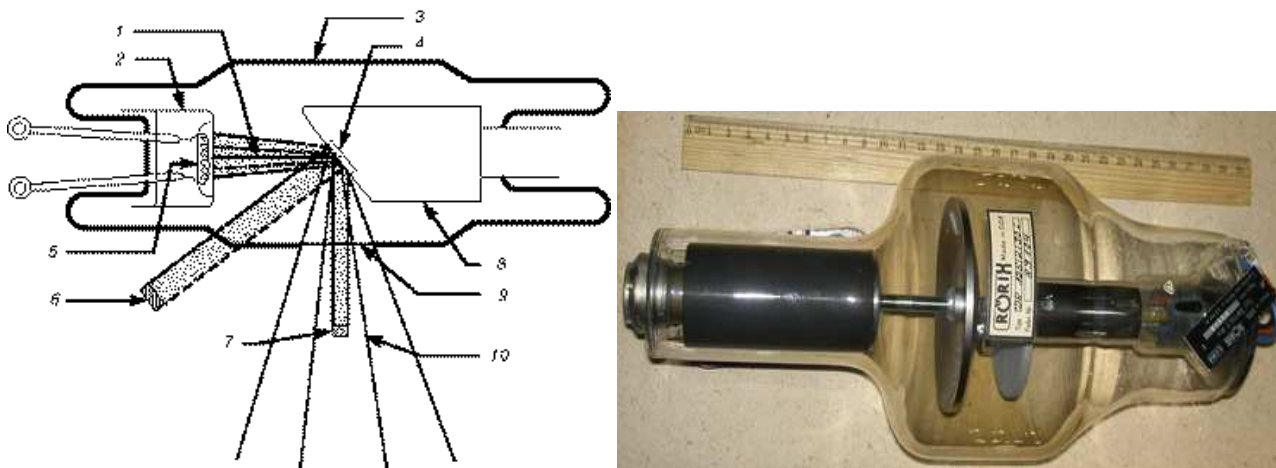


Рис. 3. Рентгеновская трубка Кулиджа

Рентгеновская трубка Кулиджа. При бомбардировке электронами вольфрамовой антикатод испускает характеристическое рентгеновское излучение. Поперечное сечение рентгеновского пучка меньше реально облучаемой площади. 1 – электронный пучок; 2 – катод с фокусирующим электродом; 3 – стеклянная оболочка (трубка); 4 – вольфрамовая мишень (антикатод); 5 – нить накала катода; 6 – реально облучаемая площадь; 7 – эффективное фокальное пятно; 8 – медный анод; 9 – окно; 10 – рассеянное рентгеновское излучение.

Электроны фокусируются на аноде с помощью электрода особой формы, окружающего катод. Этот электрод называется фокусирующим и вместе с катодом образует «электронный прожектор» трубки. Подвергаемый электронной бомбардировке анод должен быть изготовлен из тугоплавкого материала, поскольку большая часть кинетической энергии бомбардирующих электронов превращается в тепло. Кроме того, желательно, чтобы анод был из материала с большим атомным номером, т.к. выход рентгеновского излучения растет с увеличением атомного номера. В качестве материала анода чаще всего выбирается вольфрам, атомный номер которого равен 74.

Конструкция рентгеновских трубок может быть разной в зависимости от условий применения и предъявляемых требований.

## 2. Обнаружение рентгеновского излучения

Все методы обнаружения рентгеновского излучения основаны на их взаимодействии с веществом. Детекторы могут быть двух видов: те, которые дают изображение, и те, которые его не дают. К первым относятся устройства рентгеновской флюорографии и рентгеноскопии, в которых пучок рентгеновского излучения проходит через исследуемый объект, а прошедшее излучение попадает на люминесцентный экран или фотопленку. Изображение возникает благодаря тому, что разные части исследуемого объекта поглощают излучение по-разному – в зависимости от толщины вещества и его состава. В детекторах с люминесцентным экраном энергия рентгеновского излучения превращается в непосредственно наблюдаемое изображение, а в рентгенографии оно регистрируется на чувствительной эмульсии и его можно наблюдать лишь после проявления пленки.

Ко второму типу детекторов относятся самые разнообразные устройства, в которых

энергия рентгеновского излучения преобразуется в электрические сигналы, характеризующие относительную интенсивность излучения. Сюда входят ионизационные камеры, счетчик Гейгера, пропорциональный счетчик, сцинтилляционный счетчик и некоторые специальные детекторы на основе сульфида и селенида кадмия. В настоящее время наиболее эффективными детекторами можно считать сцинтилляционные счетчики, хорошо работающие в широком диапазоне энергий.

Детектор выбирается с учетом условий задачи. Например, если нужно точно измерить интенсивность дифрагированного рентгеновского излучения, то применяются счетчики, позволяющие произвести измерения с точностью до долей процента. Если же нужно зарегистрировать очень много дифрагированных пучков, то целесообразно пользоваться рентгеновской пленкой, хотя в этом случае определить интенсивность с той же точностью невозможно.

### 3. Рентгеновская и гамма-дефектоскопия

Одно из наиболее распространенных применений рентгеновского излучения в промышленности – контроль качества материалов и дефектоскопия. Рентгеновский метод является неразрушающим, так что проверяемый материал, если он найден удовлетворяющим необходимым требованиям, может затем использоваться по назначению.

И рентгеновская, и гамма-дефектоскопия основаны на проникающей способности рентгеновского излучения и особенностях его поглощения в материалах. Проникающая способность определяется энергией рентгеновских фотонов, которая зависит от ускоряющего напряжения в рентгеновской трубке. Поэтому толстые образцы и образцы из тяжелых металлов, таких, например, как золото и уран, требуют для их исследования рентгеновского источника с более высоким напряжением, а для тонких образцов достаточно источника и с более низким напряжением. Для гамма-дефектоскопии очень крупных отливок и крупного проката применяются бетатроны и линейные ускорители, ускоряющие частицы до энергий 25 МэВ и более.

Поглощение рентгеновского излучения в материале зависит от толщины поглотителя  $d$  и коэффициента поглощения  $m$  и определяется формулой  $I = I_0 e^{-md}$ , где  $I$  – интенсивность излучения, прошедшего через поглотитель,  $I_0$  – интенсивность падающего излучения, а  $e = 2,718$  – основание натуральных логарифмов.

Для данного материала при данной длине волны (или энергии) рентгеновского излучения коэффициент поглощения является константой. Но излучение рентгеновского источника не является монохроматичным, а содержит широкий спектр длин волн, вследствие чего поглощение при одной и той же толщине поглотителя зависит от длины волны (частоты) излучения.

Рентгеновское излучение широко применяется во всех отраслях промышленности, связанных с обработкой металлов давлением. Оно также применяется для контроля артиллерийских стволов, пищевых продуктов, пластмасс, для проверки сложных устройств и систем в электронной технике. (Для аналогичных целей применяется и нейтронография, в которой вместо рентгеновского излучения используются нейтронные пучки.) Рентгеновское излучение применяется и для других задач, например, для исследования полотен живописи с целью установления их подлинности или для обнаружения добавочных слоев краски поверх основного слоя.

#### 4. Дифракция рентгеновского излучения

Дифракция рентгеновского излучения дает важную информацию о твердых телах – их атомной структуре и форме кристаллов, а также о жидкостях, аморфных телах и больших молекулах. Дифракционный метод применяется также для точного (с погрешностью менее 10<sup>-5</sup>) определения межатомных расстояний, выявления напряжений и дефектов и для определения ориентации монокристаллов. По дифракционной картине можно идентифицировать неизвестные материалы, а также обнаружить присутствие в образце примесей и определить их. Значение рентгеновского дифракционного метода для прогресса современной физики трудно переоценить, поскольку современное понимание свойств материи основано в конечном счете на данных о расположении атомов в различных химических соединениях, о характере связей между ними и о дефектах структуры. Главным инструментом получения этой информации является дифракционный рентгеновский метод. Рентгеновская дифракционная кристаллография крайне важна для определения структур сложных больших молекул, таких, как молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) – генетического материала живых организмов.

Сразу после открытия рентгеновского излучения научный и медицинский интерес был сконцентрирован как на способности этого излучения проникать сквозь тела, так и на его природе. Эксперименты по дифракции рентгеновского излучения на щелях и дифракционных решетках показывали, что оно относится к электромагнитному излучению и имеет длину волны порядка 10<sup>-8</sup>–10<sup>-9</sup> см. Еще раньше ученые, в частности У.Барлоу, догадывались, что правильная и симметричная форма естественных кристаллов обусловлена упорядоченным размещением атомов, образующих кристалл. В некоторых случаях Барлоу удалось правильно предсказать структуру кристалла. Величина предсказываемых межатомных расстояний составляла 10<sup>-8</sup> см. То, что межатомные расстояния оказались порядка длины волны рентгеновского излучения, в принципе позволяло наблюдать их дифракцию. В результате возник замысел одного из самых важных экспериментов в истории физики. М.Лауэ организовал экспериментальную проверку этой идеи, которую провели его коллеги В.Фридрих и П.Книппинг. В 1912 они втроем опубликовали свою работу о результатах дифракции рентгеновского излучения.

Принципы дифракции рентгеновского излучения. Чтобы понять явление дифракции рентгеновского излучения, нужно рассмотреть по порядку: во-первых, спектр рентгеновского излучения, во-вторых, природу кристаллической структуры и, в-третьих, само явление дифракции.

Как уже говорилось выше, характеристическое рентгеновское излучение состоит из серий спектральных линий высокой степени монохроматичности, определяемых материалом анода. С помощью фильтров можно выделить наиболее интенсивные из них. Поэтому, выбрав соответствующим образом материал анода, можно получить источник почти монохроматического излучения с очень точно определенным значением длины волны. Длины волн характеристического излучения обычно лежат в диапазоне от 2,285 для хрома до 0,558 для серебра (значения для различных элементов известны с точностью до шести значащих цифр). Характеристический спектр накладывается на непрерывный «белый» спектр значительно меньшей интенсивности, обусловленный торможением в аноде падающих электронов. Таким образом, от каждого анода можно получить два типа излучения: характеристическое и тормозное, каждое из которых играет по-своему важную роль.

Атомы в кристаллической структуре располагаются с правильной периодичностью, образуя последовательность одинаковых ячеек – пространственную решетку. Некоторые решетки (например, для большинства обычных металлов) довольно просты, а другие (например, для молекул белков) весьма сложны.

Для кристаллической структуры характерно следующее: если от некоторой заданной точки одной ячейки сместиться к соответствующей точке соседней ячейки, то обнаружится точно такое же атомное окружение. И если некоторый атом расположен в той или иной точке



одной ячейки, то в эквивалентной ей точке любой соседней ячейки будет находиться такой же атом. Этот принцип строго справедлив для совершенного, идеально упорядоченного кристалла. Однако многие кристаллы (например, металлические твердые растворы) являются в той или иной степени неупорядоченными, т.е. кристаллографически эквивалентные места могут быть заняты разными атомами. В этих случаях определяется не положение каждого атома, а лишь положение атома, «статистически усредненного» по большому количеству частиц (или ячеек).

Если волны (например, звук, свет, рентгеновское излучение) проходят через небольшую щель или отверстие, то последние могут рассматриваться как вторичный источник волн, а изображение щели или отверстия состоит из чередующихся светлых и темных полос. Далее, если имеется периодическая структура из отверстий или щелей, то в результате усиливающей и ослабляющей интерференции лучей, идущих от разных отверстий, возникает четкая дифракционная картина. Дифракция рентгеновского излучения – это коллективное явление рассеяния, при котором роль отверстий и центров рассеяния играют периодически расположенные атомы кристаллической структуры. Взаимное усиление их изображений при определенных углах дает дифракционную картину, аналогичную той, которая возникла бы при дифракции света на трехмерной дифракционной решетке.

Рассеяние происходит благодаря взаимодействию падающего рентгеновского излучения с электронами в кристалле. Вследствие того, что длина волны рентгеновского излучения того же порядка, что и размеры атома, длина волны рассеянного рентгеновского излучения та же, что и падающего. Этот процесс является результатом вынужденных колебаний электронов под действием падающего рентгеновского излучения.

Рассмотрим теперь атом с облаком связанных электронов (окружающих ядро), на который падает рентгеновское излучение. Электроны во всех направлениях одновременно рассеивают падающее и испускают собственное рентгеновское излучение той же длины волны, хотя и разной интенсивности. Интенсивность рассеянного излучения связана с атомным номером элемента, т.к. атомный номер равен числу орбитальных электронов, которые могут участвовать в рассеянии. (Эта зависимость интенсивности от атомного номера рассеивающего элемента и от направления, в котором измеряется интенсивность, характеризуется атомным фактором рассеяния, который играет чрезвычайно важную роль в анализе структуры кристаллов.)

Выберем в кристаллической структуре линейную цепочку атомов, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга, и рассмотрим их дифракционную картину. Уже отмечалось, что рентгеновский спектр складывается из непрерывной части («континуума») и набора более интенсивных линий, характеристических для того элемента, который является материалом анода. Допустим, мы отфильтровали непрерывный спектр и получили почти монохроматический пучок рентгеновского излучения, направленный на нашу линейную цепочку атомов. Условие усиления (усиливающей интерференции) выполняется, если разность хода волн, рассеянных соседними атомами, кратна длине волны. Если пучок падает под углом  $\alpha_0$  к линии атомов, разделенных интервалами  $a$  (период), то для угла дифракции  $\alpha$  разность хода, соответствующая усилению, запишется в виде

$$a(\cos \alpha - \cos \alpha_0) = hl,$$

где  $l$  – длина волны, а  $h$  – целое число (рис. 4 и 5).

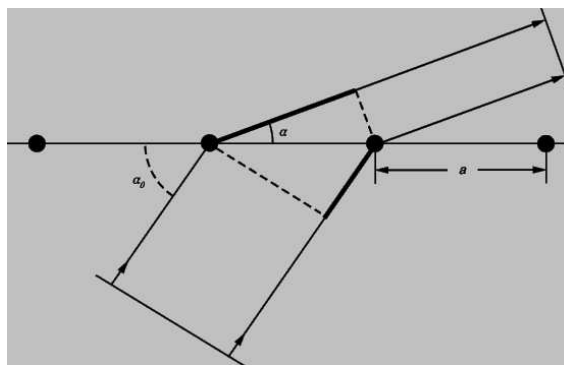


Рис. 4. Усиление рентгеновского пучка

Усиление рентгеновского пучка происходит, когда разность хода волн, рассеянных соседними атомами, равна целому кратному длины волны. Здесь  $\alpha_0$  – угол падения,  $\alpha$  – угол дифракции,  $a$  – расстояние между атомами.

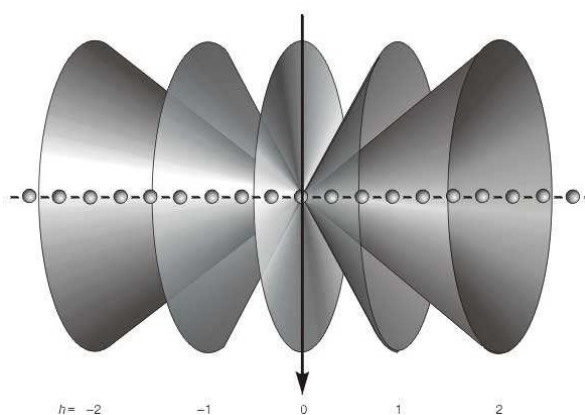


Рис. 5. Решение уравнений Лауэ

Решение уравнений Лауэ при каждом значении  $h$  можно представить в виде семейства конусов, общая ось которых направлена по кристаллографической оси (для двух других осей можно нарисовать сходные картины). На уравнениях Лауэ основан эффективный метод исследования кристаллических структур.

Чтобы распространить этот подход на трехмерный кристалл, необходимо лишь выбрать ряды атомов по двум другим направлениям в кристалле и решить совместно полученные таким образом три уравнения для трех кристаллических осей с периодами  $a$ ,  $b$  и  $c$ . Два других уравнения имеют вид

$$\begin{aligned} b(\cos \beta - \cos \beta_0) &= k\lambda, \\ a(\cos \gamma - \cos \gamma_0) &= \chi\lambda. \end{aligned}$$

Это – три фундаментальных уравнения Лауэ для дифракции рентгеновского излучения, причем числа  $h$ ,  $k$  и  $c$  – индексы Миллера для плоскости дифракции. Рассматривая любое из уравнений Лауэ, например первое, можно заметить, что, поскольку  $a, \beta_0, \lambda$  – константы, а  $h = 0, 1, 2, \dots$ , его решение можно представить в виде набора конусов с общей осью  $a$  (рис. 5). То же самое верно для направлений  $b$  и  $c$ .

В общем случае трехмерного рассеяния (дифракция) три уравнения Лауэ должны иметь общее решение, т.е. три дифракционных конуса, расположенных на каждой из осей, должны пересекаться; общая линия пересечения показана на рис. 6. Совместное решение уравнений приводит к закону Брэгга – Вульфа:

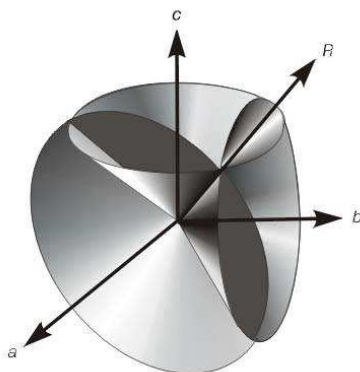


Рис. 6. Общее решение уравнений Лауэ

Общее решение уравнений Лауэ соответствует пересечению трех конусов с осями  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , имеющих общую прямую  $R$ .

$$l = 2(d/n)\sin\varphi,$$

где  $d$  – расстояние между плоскостями с индексами  $h$ ,  $k$  и  $c$  (период),  $n = 1, 2, \dots$  – целые числа (порядок дифракции), а  $\varphi$  – угол, образуемый падающим пучком (а также и дифрагирующим) с плоскостью кристалла, в которой происходит дифракция.

Анализируя уравнение закона Брэгга – Вульфа для монокристалла, расположенного на пути монохроматического пучка рентгеновского излучения, можно заключить, что дифракцию не просто наблюдать, т.к. величины  $l$  и  $\varphi$  фиксированы, а  $\sin\varphi < 1$ . При таких условиях, чтобы имела место дифракция для рентгеновского излучения с длиной волны  $l$ , плоскость кристалла с периодом  $d$  должна быть повернута на правильный угол  $\varphi$ . Для того чтобы реализовать это маловероятное событие, применяются различные методики.

## 5. Методы дифракционного анализа

Метод Лауэ. В методе Лауэ применяется непрерывный «белый» спектр рентгеновского излучения, которое направляется на неподвижный монокристалл. Для конкретного значения периода  $d$  из всего спектра автоматически выбирается соответствующее условию Брэгга – Вульфа значение длины волны. Получаемые таким образом Лауэ граммы дают возможность судить о направлениях дифрагированных пучков и, следовательно, об ориентациях плоскостей кристалла, что позволяет также сделать важные выводы относительно симметрии, ориентации кристалла и наличия в нем дефектов. При этом, однако, утрачивается информация о пространственном периоде  $d$ . На рис. 7 приводится пример Лауэ граммы. Рентгеновская пленка располагалась со стороны кристалла, противоположной той, на которую падал рентгеновский пучок из источника.

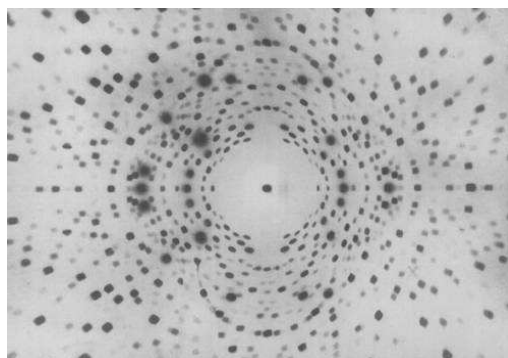


Рис. 7. Лауэ грамма

Лауэ грамма. Через неподвижный кристалл пропускается рентгеновское излучение широкого спектрального диапазона. Дифракционным пучкам соответствуют пятна на Лауэ грамме.

Метод Дебая – Шеррера (для поликристаллических образцов). В отличие от предыдущего метода, здесь используется монохроматическое излучение ( $I = \text{const}$ ), а варьируется угол  $\varphi$ . Это достигается использованием поликристаллического образца, состоящего из многочисленных мелких кристаллитов случайной ориентации, среди которых имеются и удовлетворяющие условию Брэгга – Вульфа. Дифрагированные пучки образуют конусы, ось которых направлена вдоль пучка рентгеновского излучения. Для съемки обычно используется узкая полоска рентгеновской пленки в цилиндрической кассете, а рентгеновские лучи распространяются по диаметру через отверстия в пленке. Полученная таким образом Дебае грамма (рис. 8) содержит точную информацию о периоде  $d$ , т.е. о структуре кристалла, но не дает информации, которую содержит Лауэ грамма. Поэтому оба метода взаимно дополняют друг друга. Рассмотрим некоторые применения метода Дебая – Шеррера.



Рис. 8. Дебае грамма

Дебае грамма получается путем пропускания рентгеновского излучения через поликристаллический образец. Каждая линия обусловлена дифракцией рентгеновского излучения на одной конкретной плоскости атомов образца.

Идентификация химических элементов и соединений. По определенному из Дебае граммы углу  $\varphi$  можно вычислить характерное для данного элемента или соединения межплоскостное расстояние  $d$ . В настоящее время составлено множество таблиц значений  $d$ , позволяющих идентифицировать не только тот или иной химический элемент или соединение, но и различные фазовые состояния одного и того же вещества, что не всегда дает химический анализ. Можно также в сплавах замещения с высокой точностью определять содержание второго компонента по зависимости периода  $d$  от концентрации.

**Анализ напряжений.** По измеренной разнице межплоскостных расстояний для разных направлений в кристаллах можно, зная модуль упругости материала, с высокой точностью вычислять малые напряжения в нем.

**Исследования преимущественной ориентации в кристаллах.** Если малые кристаллиты в поликристаллическом образце ориентированы не совсем случайным образом, то кольца на дебаеграмме будут иметь разную интенсивность. При наличии резко выраженной преимущественной ориентации максимумы интенсивности концентрируются в отдельных пятнах на снимке, который становится похож на снимок для монокристалла. Например, при глубокой холодной прокатке металлический лист приобретает текстуру – выраженную ориентацию кристаллитов. По дебаеграмме можно судить о характере холодной обработки материала.

**Исследование размеров зерен.** Если размер зерен поликристалла более  $10^3$  см, то линии на дебаеграмме будут состоять из отдельных пятен, поскольку в этом случае число кристаллитов недостаточно для того, чтобы перекрыть весь диапазон значений углов  $\varphi$ . Если же размер кристаллитов менее  $10^3$  см, то дифракционные линии становятся шире. Их ширина обратно пропорциональна размеру кристаллитов. Уширение происходит по той же причине, по которой при уменьшении числа щелей уменьшается разрешающая способность дифракционной решетки. Рентгеновское излучение позволяет определять размеры зерен в диапазоне  $10^3$ – $10^6$  см.

**Методы для монокристаллов.** Чтобы дифракция на кристалле давала информацию не только о пространственном периоде, но и об ориентации каждой совокупности дифрагирующих плоскостей, используются методы вращающегося монокристалла. На кристалл падает монохроматический пучок рентгеновского излучения. Кристалл вращается вокруг главной оси, для которой выполняются уравнения Лауэ. При этом изменяется угол  $\varphi$ , входящий в формулу Брэгга – Вульфа. Дифракционные максимумы располагаются в месте пересечения дифракционных конусов Лауэ с цилиндрической поверхностью пленки (рис. 9). В результате получается дифракционная картина типа представленной на рис. 10. Однако возможны осложнения из-за перекрытия разных дифракционных порядков в одной точке. Метод может быть значительно усовершенствован, если одновременно с вращением кристалла перемещать определенным образом и пленку.

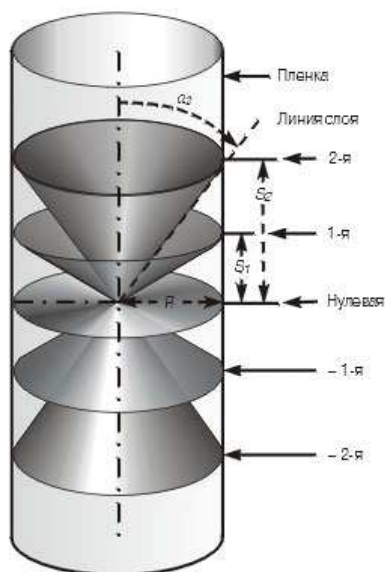


Рис. 9. Метод вращающегося монокристалла

Метод вращающегося монокристалла дает дифракционные максимумы (пятна) различных порядков вдоль линии, соответствующей данному атомному слою. Максимумы возникают на пересечении конусов Лауэ с цилиндрической поверхностью фотопленки.

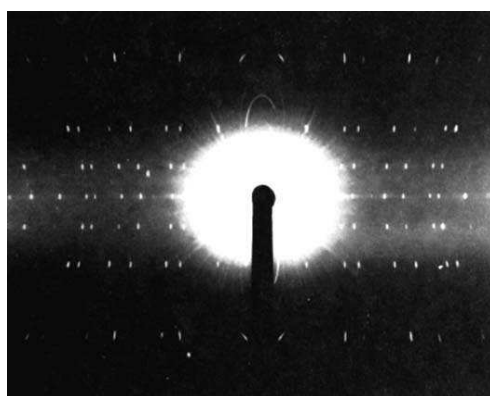


Рис. 10. Снимок, полученный методом качающегося кристалла (монокристалла теллура). Видны линии слоев для нулевого порядка (средняя горизонтальная линия) и высших порядков (+1, +2, +3 – от линии нулевого порядка вверх; -1, -2, -3 – вниз).

**Исследования жидкостей и газов.** Известно, что жидкости, газы и аморфные тела не обладают правильной кристаллической структурой. Но и здесь между атомами в молекулах существует химическая связь, благодаря которой расстояние между ними остается почти постоянным, хотя сами молекулы в пространстве ориентированы случайным образом. Такие

материалы тоже дают дифракционную картину с относительно небольшим числом размытых максимумов. Обработка такой картины современными методами позволяет получить информацию о структуре даже таких некристаллических материалов.

## 6. Спектрохимический рентгеновский анализ

Уже через несколько лет после открытия рентгеновских лучей Ч.Баркла (1877–1944) обнаружил, что при воздействии потока рентгеновского излучения высокой энергии на вещество возникает вторичное флуоресцентное рентгеновское излучение, характеристическое для исследуемого элемента. Вскоре после этого Г.Мозли в серии своих экспериментов измерил длины волн первичного характеристического рентгеновского излучения, полученного электронной бомбардировкой различных элементов, и вывел соотношение между длиной волны и атомным номером. Эти эксперименты, а также изобретение Брэггом рентгеновского спектрометра заложили основу для спектрохимического рентгеновского анализа.

Возможности рентгеновского излучения для химического анализа были сразу осознаны. Были созданы спектрографы с регистрацией на фотопластинке, в которых исследуемый образец выполнял роль анода рентгеновской трубки. К сожалению, такая техника оказалась очень трудоемкой, а потому применялась лишь тогда, когда были неприменимы обычные методы химического анализа. Выдающимся примером новаторских исследований в области аналитической рентгеноспектроскопии стало открытие в 1923 Г.Хевеши и Д.Костером нового элемента – гафния. Разработка мощных рентгеновских трубок для рентгенографии и чувствительных детекторов для радиохимических измерений во время Второй мировой войны в значительной степени обусловила быстрый рост рентгеновской спектрографии в последующие годы.

Этот метод получил широкое распространение благодаря скорости, удобству, неразрушающему характеру анализа и возможности полной или частичной автоматизации. Он применим в задачах количественного и качественного анализа всех элементов с атомным номером более 11 (натрий). И хотя рентгеновский спектрохимический анализ обычно используется для определения важнейших компонентов в образце (с содержанием 0,1–100%), в некоторых случаях он пригоден для концентраций 0,005% и даже ниже.

**Рентгеновский спектрометр.** Современный рентгеновский спектрометр состоит из трех основных систем (рис. 11): системы возбуждения, т.е. рентгеновской трубки с анодом из вольфрама или другого тугоплавкого материала и блоком питания; системы анализа, т.е. кристалла-анализатора с двумя многощелевыми коллиматорами, а также спектрогонометра для точной юстировки; и системы регистрации со счетчиком Гейгера либо пропорциональным или сцинтилляционным счетчиком, а также выпрямителем, усилителем, пересчетными устройствами и самописцем или другим регистрирующим устройством.

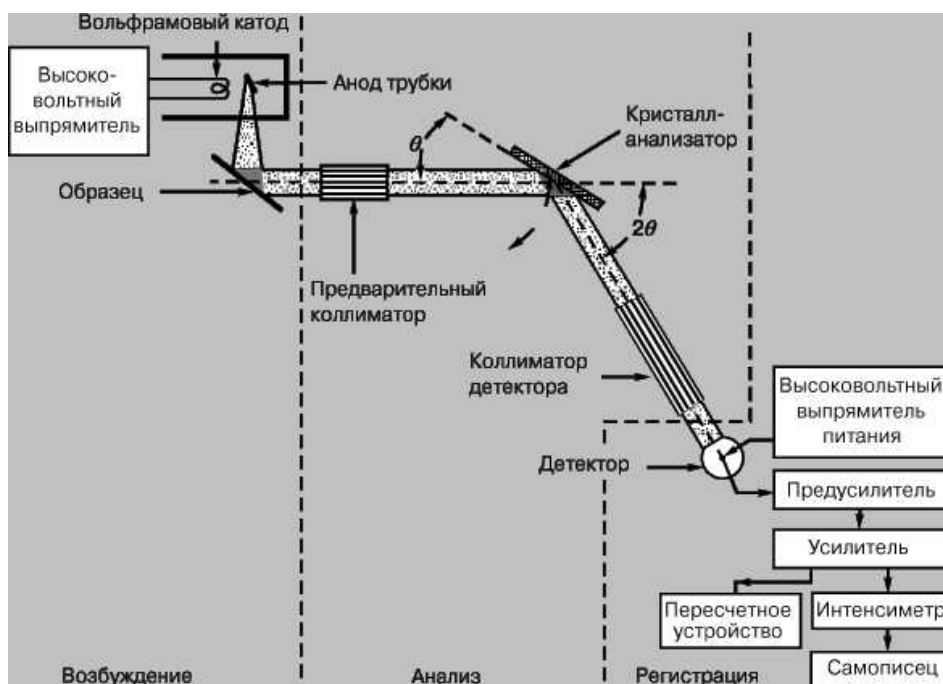


Рис. 11. Рентгеновский спектрометр (блок-схема) с кристаллом-анализатором. Основные блоки прибора: блок возбуждения образца (с рентгеновской трубкой), блок анализа с плоским кристаллом-анализатором и коллиматорами и блок регистрации с электронным детектором.

**Рентгеновский флуоресцентный анализ.** Анализируемый образец располагается на пути возбуждающего рентгеновского излучения. Исследуемая область образца обычно выделяется маской с отверстием нужного диаметра, а излучение проходит через коллиматор, формирующий параллельный пучок. За кристаллом-анализатором щелевой коллиматор выделяет дифрагированное излучение для детектора. Обычно максимальный угол  $\varphi$  ограничивается значениями  $80\text{--}85^\circ$ , так что дифрагировать на кристалле-анализаторе может только то рентгеновское излучение, длина волны  $\lambda$  которого связана с межплоскостным расстоянием  $d$  неравенством  $\lambda < 1,95d$ . Максимальной же разрешающей способности можно добиться, уменьшая величину  $d$ . Наилучшие результаты получены с кристаллами-анализаторами из топаза, фторида лития, хлорида натрия, кварца и др. Кроме того, в спектрометрах с изогнутыми кристаллами, о которых говорится ниже, иногда используются кристаллы слюды и гипса.

**Рентгеновский микроанализ.** Описанный выше спектрометр с плоским кристаллом-анализатором может быть приспособлен для микроанализа. Это достигается сужением либо первичного пучка рентгеновского излучения, либо вторичного пучка, испускаемого образцом. Однако уменьшение эффективного размера образца или апертуры излучения приводит к уменьшению интенсивности регистрируемого дифрагированного излучения. Улучшение этого метода может быть достигнуто применением спектрометра с изогнутым кристаллом, позволяющего регистрировать конус расходящегося излучения, а не только излучение, параллельное оси коллиматора. При помощи такого спектрометра можно идентифицировать частицы размером менее  $25\text{ мкм}$ . Еще большее уменьшение размера анализируемого образца достигается в электронно-зондовом рентгеновском микроанализаторе, изобретенном Р.Кастэном. Здесь остросфокусированным электронным лучом возбуждается характеристическое рентгеновское излучение образца, которое затем анализируется спектрометром с изогнутым кристаллом. С помощью такого прибора удается обнаруживать количества вещества порядка  $10\text{--}14\text{ г}$  в образце диаметром  $1\text{ мкм}$ . Были также разработаны установки с электронно-лучевым сканированием образца, с помощью которых можно получить двумерную картину распределения по образцу того элемента, на характеристическое излучение которого настроен спектрометр.

## 7. Медицинская рентгенодиагностика

Развитие техники рентгеновских исследований позволило значительно сократить время экспозиции и улучшить качество изображений, позволяющих изучать даже мягкие ткани.

**Флюорография.** Этот метод диагностики заключается в фотографировании теневого изображения с просвечивающего экрана. Пациент находится между источником рентгеновского излучения и плоским экраном из люминофора (обычно иодида цезия), который под действием рентгеновского излучения светится. Биологические ткани той или иной степени плотности создают тени рентгеновского излучения, имеющие разную степень интенсивности. Врач-рентгенолог исследует теневое изображение на люминесцентном экране и ставит диагноз.

В прошлом рентгенолог, анализируя изображение, полагался на зрение. Сейчас имеются разнообразные системы, усиливающие изображение, выводящие его на телевизионный экран или записывающие данные в памяти компьютера.

**Рентгенография.** Запись рентгеновского изображения непосредственно на фотопленке называется рентгенографией. В этом случае исследуемый орган располагается между источником рентгеновского излучения и фотопленкой, которая фиксирует информацию о состоянии органа в данный момент времени. Повторная рентгенография дает возможность судить о его дальнейшей эволюции.

Рентгенография позволяет весьма точно исследовать целостность костных тканей, которые состоят в основном из кальция и непрозрачны для рентгеновского излучения, а также разрывы мышечных тканей. С ее помощью лучше, чем стетоскопом или прослушиванием, анализируется состояние легких при воспалении, туберкулезе или наличии жидкости. При помощи рентгенографии определяются размер и форма сердца, а также динамика его изменений у пациентов, страдающих сердечными заболеваниями.

**Контрастные вещества.** Прозрачные для рентгеновского излучения части тела и полости отдельных органов становятся видимыми, если их заполнить контрастным веществом, безвредным для организма, но позволяющим визуализировать форму внутренних органов и проверить их функционирование. Контрастные вещества пациент либо принимает внутрь (как, например, бариевые соли при исследовании желудочно-кишечного тракта), либо они вводятся внутривенно (как, например, иодсодержащие растворы при исследовании почек и мочевыводящих путей). В последние годы, однако, эти методы вытесняются методами диагностики, основанными на применении радиоактивных атомов и ультразвука.

**Компьютерная томография.** В 1970-х годах был развит новый метод рентгеновской диагностики, основанный на полной съемке тела или его частей. Изображения тонких слоев («срезов») обрабатываются компьютером, и окончательное изображение выводится на экран монитора. Такой метод называется компьютерной рентгеновской томографией. Он широко применяется в современной медицине для диагностики инфильтратов, опухолей и других нарушений мозга, а также для диагностики заболеваний мягких тканей внутри тела. Эта методика не требует введения инородных контрастных веществ и потому является быстрой и более эффективной, чем традиционные методики.

## 8. Биологическое действие рентгеновского излучения

Вредное биологическое действие рентгеновского излучения обнаружилось вскоре после его открытия Рентгеном. Оказалось, что новое излучение может вызвать что-то вроде сильного солнечного ожога (эритему), сопровождающееся, однако, более глубоким и стойким повреждением кожи. Появившиеся язвы нередко переходили в рак. Во многих случаях приходилось ампутировать пальцы или руки. Случались и летальные исходы.

Было установлено, что поражения кожи можно избежать, уменьшив время и дозу облучения, применяя экранировку (например, свинец) и средства дистанционного управления. Но постепенно выявились и другие, более долговременные последствия рентгеновского об-



лучения, которые были затем подтверждены и изучены на подопытных животных. К эффектам, обусловленным действием рентгеновского излучения, а также других ионизирующих излучений (таких, как гамма-излучение, испускаемое радиоактивными материалами) относятся: 1) временные изменения в составе крови после относительно небольшого избыточного облучения; 2) необратимые изменения в составе крови (гемолитическая анемия) после длительного избыточного облучения; 3) рост заболеваемости раком (включая лейкемию); 4) более быстрое старение и ранняя смерть; 5) возникновение катаракт. Ко всему прочему, биологические эксперименты на мышах, кроликах и мушках (дрозофилах) показали, что даже малые дозы систематического облучения больших популяций вследствие увеличения темпа мутации приводят к вредным генетическим эффектам. Большинство генетиков признает применимость этих данных и к человеческому организму. Что же касается биологического воздействия рентгеновского излучения на человеческий организм, то оно определяется уровнем дозы облучения, а также тем, какой именно орган тела подвергался облучению. Так, например, заболевания крови вызываются облучением кроветворных органов, главным образом костного мозга, а генетические последствия – облучением половых органов, могущим привести также и к стерильности.

Накопление знаний о воздействии рентгеновского излучения на организм человека привело к разработке национальных и международных стандартов на допустимые дозы облучения, опубликованных в различных справочных изданиях.

Кроме рентгеновского излучения, которое целенаправленно используется человеком, имеется и так называемое рассеянное, побочное излучение, возникающее по разным причинам, например вследствие рассеяния из-за несовершенства свинцового защитного экрана, который это излучение не поглощает полностью. Кроме того, многие электрические приборы, не предназначенные для получения рентгеновского излучения, тем не менее генерируют его как побочный продукт. К таким приборам относятся электронные микроскопы, высоковольтные выпрямительные лампы (кенотроны), а также кинескопы устаревших цветных телевизоров. Производство современных цветных кинескопов во многих странах находится сейчас под правительственным контролем.

## 9. Опасные факторы рентгеновского излучения

Виды и степень опасности рентгеновского облучения для людей зависят от контингента лиц, подверженных облучению.

**Профессионалы, работающие с рентгеновской аппаратурой.** Эта категория охватывает врачей-рентгенологов, стоматологов, а также научно-технических работников и персонал, обслуживающий и использующий рентгеновскую аппаратуру. Принимаются эффективные меры по снижению уровня радиации, с которым им приходится иметь дело.

**Пациенты.** Строгих критериев здесь не существует, и безопасный уровень облучения, который получают пациенты во время лечения, определяется лечащими врачами. Врачам не рекомендуется без необходимости подвергать пациентов рентгеновскому обследованию. Особую осторожность следует проявлять при обследовании беременных женщин и детей. В этом случае принимаются специальные меры.

**Методы контроля.** Здесь имеются в виду три аспекта: 1) наличие адекватного оборудования, 2) контроль за соблюдением правил техники безопасности, 3) правильное использование оборудования.

При рентгеновском обследовании воздействию облучения должен подвергаться только нужный участок, будь то стоматологические обследования или обследование легких. Отметим, что сразу после выключения рентгеновского аппарата исчезает как первичное, так и вторичное излучение; отсутствует также и какое-либо остаточное излучение, о чем не всегда знают даже те, кто по своей работе с ним непосредственно связан.

## Заключение

Таким образом, рентгеновские лучи представляют собой невидимое электромагнитное излучение с длиной волны  $10^5 - 10^2$  нм. Рентгеновские лучи могут проникать через некоторые непрозрачные для видимого света материалы. Испускаются они при торможении быстрых электронов в веществе (непрерывный спектр) и при переходах электронов с внешних электронных оболочек атома на внутренние (линейчатый спектр). Источниками рентгеновского излучения являются: рентгеновская трубка, некоторые радиоактивные изотопы, ускорители и накопители электронов (синхротронное излучение). Приемники – фотопленка, люминисцентные экраны, детекторы ядерных излучений. Рентгеновские лучи применяют в рентгеноструктурном анализе, медицине, дефектоскопии, рентгеновском спектральном анализе и т. п.

### **Список использованных источников:**

1. Кудрявцев П.С. История физики. – М., 1956.
2. Кудрявцев П.С. Курс физики – М.: Просвещение, 1974.
3. Рукман Г.И. , Клименко И.С. Электронная микроскопия. – М.: Знание, 1968.
4. Савельев И.В. Курс физики. – М.: Наука, 1989.
5. Храмов Ю. А. Физика. – М.: Наука, 1983.
6. <http://www.krugosvet.ru/>