

©1995 г.

РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ

(К 100-летию открытия)

Ю.А.Быстров, С.А.Иванов

“Если пропустить разряд большой катушки Румкорфа через трубку Гитторфа, Крукса, Ленарда или другой подобный прибор, то наблюдается следующее явление. Кусок бумаги, покрытой платиносинеродистым барием, при приближении к трубке, закрытой достаточно плотно прилегающим к ней чехлом из тонкого черного картона, при каждом разряде вспыхивает ярким светом: начинает флюоресцировать... Легко убедиться, что причина флюоресценции исходит именно от разрядной трубки... По поводу этого явления проще всего предположить, что черный картон... пронизывается каким-то агентом, вызывающим энергичную флюоресценцию... Легко найти, что все тела проницаемы для этого агента, но в различной степени.”

Такими словами начинается первое сообщение профессора физики Вюрцбургского университета (Германия) Вильгельма Конрада Рентгена (1845–1923 гг.) о наблюдениях, выполненных им в своей лаборатории 8 ноября 1895 г. [1]. Это сообщение было опубликовано 28 декабря 1895 г. в статье “Uber eine neue Art von Strahlen” [2].

Так начинается история одного из самых выдающихся научных событий конца XIX века — открытия X-лучей, как назвал их Рентген, или рентгеновских лучей, как называют их теперь в память о первооткрывателе.

В цитированной и двух последующих работах [3–4] Рентген подробно описывает удивительные свойства X-лучей, главные из которых — проникающая способность, фотографическое действие, способность вызывать ионизацию воздуха и флюоресценцию некоторых веществ. Он установил, что лучи исходят из того участка разрядной трубки, который бомбардируется катодными лучами.

Открытие Рентгена сразу привлекло внимание широких научных кругов. С одной стороны, было открыто явление, которое требовало теоретического описания, с другой стороны, появились широкие возможности его практического использования, и прежде всего в медицине. Здесь X-лучи стали широко использоваться для диагностики и, таким образом, было положено начало самостоятельной области медицины — рентгенологии.



Памятник Рентгену, открытый 17 февраля 1928 г. в Ленинграде.

Значимость открытия Рентгена была признана научной общественностью мира. Нобелевским комитетом 12 ноября 1901 г. ему была присуждена премия “За открытие лучей, которые носят его имя”, как говорится в решении комитета. Таким образом, Рентген стал первым Нобелевским лауреатом по физике.

Важным этапом в изучении свойств рентгеновских лучей явились работы Баркла, который в 1906 г. открыл так называемое характеристическое излучение [5]. За это открытие в 1918 г. Барклу была присуждена Нобелевская премия по физике.

Хотя рентгеновские лучи быстро нашли широкое практическое применение, их природа оставалась не раскрытой. Практически все, кто занимался изучением рентгеновских лучей, предполагали, что они представляют собой волны. Однако явления, присущие волновым процессам: интерференция, дифракция и т. д., экспериментально обнаружить не удавалось.

Решающим этапом в экспериментальном доказательстве волновой природы рентгеновского излучения явились опыты Лауэ, проведенные в 1912 г. [6,7]. В этих опытах была зарегистрирована дифракционная картина, возникавшая при прохождении рентгеновского излучения через кристаллическую решетку. Однако установить взаимосвязь между положением максимумов дифракционной картины и строением кристалла оказалось делом сложным.

Решение этой проблемы было получено в 1913 г. независимо английскими физиками У.Г. и У.Л.Бреггами и русским ученым Г.В.Вульфом [8,9], которые нашли условие дифракционного отражения рентгеновских лучей от кристаллов

$$2d \sin \varphi = n\lambda.$$

Данное соотношение, называемое законом Вульфа–Брегга, связывает между собой длину волны излучения λ , расстояние между атомными плоскостями d и угол φ , под которым наблюдается дифракционный максимум, n — порядок отражения.

Работы Лауэ и Бреггов были отмечены Нобелевскими премиями по физике за 1914 и 1915 гг. соответственно. Эти работы явились основополагающими для развития двух важных научных направлений: рентгеноструктурного анализа и рентгеновской спектроскопии. Из приведенного выше соотношения следует, что, используя рентгеновское излучение с известной длиной волны λ и измерив угол φ , можно определить важнейший параметр кристалла — межплоскостное расстояние d (рентгеноструктурный анализ). Применяя кристалл с известным d и измеряя угол, под которым происходит отражение, можно определить длину волны, а поворачивая кристалл, получить спектр излучения (рентгеновская спектроскопия).

Метод рентгеновской спектроскопии позволил Мозли в 1913 г. установить важную закономерность в спектрах характеристического излучения: с увеличением атомного номера элементов их характеристические спектры смещаются в сторону коротких длин волн [10,11]. Эта закономерность довольно просто объяснялась в рамках теории атома Бора и, таким образом, явилась убедительным экспериментальным подтверждением квантовых представлений.

В 1915 г. Дюан и Хант экспериментально установили [12], что непрерывный рентгеновский спектр имеет коротковолновую границу, которой соответствует длина волны

$$\lambda_{\min} = 1.24/V, nm,$$

где V — напряжение на рентгеновской трубке в кВ.

Эта важнейшая особенность непрерывного рентгеновского спектра также легко объясняется на основе теории квантов.

В усовершенствование методов экспериментального исследования рентгеновских спектров внес существенный вклад М.Зигбан, разработавший аппаратуру для прецизионных измерений [13]. Это позволило исследовать рентгеновский спектр в далекой длинноволновой области и использовать рентгеновскую спектроскопию для изучения твердого тела. В 1924 г. Зигбану была присуждена Нобелевская премия по физике за спектроскопические исследования в диапазоне рентгеновских лучей.

В 1919 г. Стенстрем, изучая отражение рентгеновских лучей от кристаллов, обнаружил отклонение от закона Вульфа–Брегга, которое он объяснил преломлением рентгеновских лучей в кристаллах.

Параллельно с широкими экспериментальными исследованиями проводились работы в области теории рентгеновских спектров и взаимодействия излучения с веществом. К числу первых теоретических

исследованиям относятся работы Стокса [14] и Томсона [15]. Предложенная ими теория импульсов базировалась на представлениях классической электродинамики. Из этой теории следовали выводы о непрерывности спектра излучения, поляризации лучей, анизотропии пространственного распределения интенсивности.

Позднее Крамерс [16] и Венцель [17], используя квантовые представления и боровский принцип соответствия, получили теоретическое описание спектра, которое правильно отражает влияние на интенсивность атомного номера материала мишени и величины ускоряющего электроны напряжения.

Следующим существенным шагом в разработке теории непрерывного спектра явились исследования Зоммерфельда, выполненные на основе квантовой механики [18,19]. В частности, им было получено выражение для углового распределения интенсивности рентгеновского излучения при релятивистских скоростях электронов.

Усилия многих физиков-теоретиков были направлены на исследование механизма взаимодействия рентгеновского излучения с веществом. Было установлено, что сложный процесс взаимодействия может рассматриваться как совокупность ряда независимых элементарных процессов, вероятность которых зависит от длины волны излучения и рода вещества. К таким процессам относятся фотоэлектрический эффект, когерентное и некогерентное рассеяние, эффект образования электронно-позитронных пар в поле атомных ядер и электронов и др.

Фотоэлектрический эффект, в котором ярко проявляется корпускулярная природа излучения, доминирует в механизме ослабления излучения веществом в длинноволновой области. Скорости фотоэлектронов определяются уравнением Эйнштейна для фотоэффекта. Атом, у которого под действием излучения удалены электроны с внутренних оболочек, возвращается в нормальное состояние, испуская фотоны характеристического излучения. По длине волны этого излучения можно определить атомный номер элемента, т. е. осуществить химический анализ вещества.

Теория когерентного рассеяния рентгеновского излучения, при котором длина волны излучения не изменяется, была развита Томсоном. Он исходил из того, что под действием электромагнитного поля рентгеновских лучей в соответствии с классической электродинамикой электроны атомов вещества осциллируют и при этом сами излучают волны той же длины. Если облучаемым веществом является кристалл, то в результате когерентного рассеяния может возникнуть дифракционная картина. В этом явлении, которое наблюдается в длинноволновой области, проявляется волновая природа рентгеновских лучей.

В изучение дифракции рентгеновских лучей внес значительный вклад Дебай. Им, в частности, был предложен ныне широко используемый метод анализа структуры поликристаллических веществ.

В 1936 г. Дебаю была присуждена Нобелевская премия по химии за вклад, который он внес в наши знания о структуре молекул своими исследованиями дипольных моментов, а также дифракции рентгеновских лучей и электронов в газах.

При уменьшении длины волны рентгеновского излучения, как было установлено экспериментально, характер рассеяния меняется. В спектре рассеянного излучения наряду с когерентно рассеянным излучением

ем регистрируется излучение с большей длиной волны. Теория этого явления была разработана Комптоном [20]. Согласно этой теории, при взаимодействии фотона рентгеновского излучения со свободным электроном фотон теряет часть своей энергии, передавая ее электрону, и отклоняется на определенный угол. Потеря энергии приводит к увеличению длины волны на $\Delta\lambda$, которая зависит от угла отклонения θ

$$\Delta\lambda = 2 \frac{h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

где h — постоянная Планка, m_0 — масса покоя электрона, c — скорость света.

Это явление получило название эффекта Комптона. За открытие этого эффекта Комптон в 1927 г. был удостоен Нобелевской премии по физике.

Теоретические расчеты коэффициентов ослабления за счет фотоэффекта и комптоновского рассеяния показывают, что с уменьшением длины волны излучения его проникающая способность увеличивается. Однако экспериментально было установлено, что при переходе в область очень коротких длин волн ($\lambda < 0.01 \text{ \AA}$) проникающая способность начинает уменьшаться. Объяснение этому явлению было найдено в 1933 г., когда был открыт эффект образования электронно-позитронных пар. При энергиях фотонов $h\nu > 1.022 \text{ МэВ}$ в кулоновском поле ядра происходит преобразование фотона в пару частиц — электрон и позитрон. Вероятность этого процесса с ростом энергии фотонов рентгеновского излучения растет. Первые фотографии одновременного появления пар электрон-позитрон были получены супругами Жолио-Кюри в камере Вильсона [21].

Со времени открытия Рентгена в течение двух десятилетий в качестве источника излучения использовались газоразрядные трубки, давление воздуха в которых лежало в пределах 10^{-3} – 10^{-2} Тор. Присущие этим трубкам недостатки: малая интенсивность рентгеновского пучка, нестабильность его параметров, невозможность изменять интенсивность излучения при сохранении проникающей способности, большой размер источника излучения (фокусного пятна) побуждали поиски новых генераторов излучения.

Радикальное улучшение трубок предложили Лилиенфельд [22] и Кулидж [23], создавшие вакуумные трубки с накалимым вольфрамовым катодом. Трубки Кулиджа явились прообразом современных рентгеновских трубок.

Уже первые трубки Кулиджа содержали основные элементы конструкции, используемые и до настоящего времени: прямонакальный катод в виде спирали, фокусирующий электрод (цилиндр Венельта), массивный анод. В таких трубках стало возможным при их работе на участке насыщения регулировать интенсивность тормозного излучения при сохранении его спектрального состава. Это имело огромное значение при использовании трубок для рентгенографирования различных объектов (диагностика, дефектоскопия и т. д.), так как давало возможность резко повысить качество снимков. Изменение потенциала фокусирующего электрода позволяло регулировать размер фокусного пятна, а следовательно, влиять на резкость регистрируемых снимков.

Создание электронных рентгеновских трубок явилось этапным событием в рентгенотехнике. В развитых странах был начат промышленный выпуск рентгеновских аппаратов. В результате рентгеновские методы вышли за пределы физических лабораторий и стали широко использоваться в лечебных учреждениях, на промышленных предприятиях. Такое широкое использование рентгеновских методов в свою очередь инициировало создание специализированных трубок. Были разработаны трубки для медицинской диагностики, структурного анализа, спектрального анализа, просвечивания материалов и т. д.

Медицинская диагностика нуждалась в трубках, обеспечивающих получение снимков подвижных органов человека за очень короткое время, что требовало большой интенсивности пучка. Проблема была решена путем создания трубок с вращающимся анодом. Для структурного анализа требовались источники мягкого излучения с определенной длиной волны. В результате были разработаны трубки с анодами из различных материалов (хром, медь, молибден, серебро), которые давали характеристическое излучение K -серии. Для выпуска этого излучения из трубки с малым ослаблением стали использовать специальные тонкие окна из легкоатомных материалов (специальное стекло "гетан", слюда, бериллий). Наиболее разнообразными по конструкции оказались трубки для просвечивания материала. Например, для дефектоскопии полых изделий были созданы трубки с вынесенным анодом.

В качестве источника высокого напряжения для питания анодной цепи трубки использовались высоковольтные трансформаторы и соответствующие выпрямители и умножители напряжения. Максимальное напряжение рентгеновских аппаратов, построенных по такому принципу, не превышало 400–500 кВ. Однако развитие техники и радиационной медицины требовало создания источников более жесткого излучения. Применением прямых методов ускорения электронов эту задачу решить не удавалось, так как с повышением напряжения резко возрастают трудности обеспечения электрической прочности. Радикально эта проблема была решена созданием ускорителей электронов.

Для получения жесткого рентгеновского излучения стали использоваться линейные и циклические ускорители. В 1941 г. Керст создал первый индукционный циклический ускоритель электронов — бетатрон^[24], идея которого была предложена Слепяном^[25]. Бетатрон на энергию до 30 МэВ имеет относительно небольшие габариты, комплектуется отпаянными ускорительными камерами, прост в эксплуатации. Поэтому в течение длительного времени бетатрон являлся основным типом источника рентгеновского излучения в промышленной дефектоскопии и медицине, где он использовался для нужд терапии.

В 50-е годы благодаря успехам в развитии сверхвысокочастотной электроники были разработаны линейные ускорители электронов с бегущей волной. В результате непрерывного совершенствования их конструкции в последующие годы были созданы эффективные компактные установки. Ускорители этого типа на энергию 3–50 МэВ, дающие мощное рентгеновское излучение, применяются для дефектоскопии крупных промышленных изделий, в радиационной химии, для активационного анализа и в медицине.

В настоящее время рентгеновские методы касаются многих сторон жизни общества — здравоохранения, производственной деятельности, сельского хозяйства и науки.

Медицина была и остается той областью применения рентгеновского излучения, с которой связан буквально каждый человек. Именно этой области во многих странах уделялось особое внимание как в части совершенствования методик диагностики, так и аппаратуры для их реализации. Современные диагностические методы позволяют исследовать функции практически всех органов человека, выявлять их патологию и заболевание на ранних стадиях. Одним из наиболее значительных достижений в этой области явилось создание вычислительных томографов — диагностических комплексов, обеспечивающих получение на экране дисплея высокоинформативных послойных изображений исследуемых органов. Идея компьютерного метода рентгеновской томографии была предложена в 1963 г. физиком из Кейптауна Кормаком. Однако эта идея была реализована лишь в 1969 г. английским инженером Хаунсфилдом после того, как появились компьютеры с необходимыми параметрами. Использование вычислительных томографов позволяет обнаруживать опухоли размером с булавочную головку, что, естественно, резко повышает шансы на вылечение. В 1979 г. Кормаку и Хаунсфилду была присуждена Нобелевская премия по физиологии и медицине за разработку метода осевой томографии.

Другой важной областью медицинского использования рентгеновского излучения является терапия. Поскольку опухолевые клетки более чувствительны к воздействию радиации, чем здоровые клетки, то путем облучения удается избирательно разрушать большие клеточные массы, практически не нанося вреда здоровым тканям и органам человека.

Чрезвычайно велика роль рентгеновских методов в области техники и промышленного производства. Использование рентгеновского излучения для получения теневых картин исследуемых объектов явилось эффективным средством неразрушающего контроля их качества. В настоящее время все детали ответственных конструкций (элементы АЭС, космических аппаратов, корпуса подводных лодок, нефте- и газопроводы, мостовые сооружения и др.) проходят рентгенографический контроль. В производстве массовой продукции (микросхемы, полупроводниковые приборы и др.) осуществляется выборочный контроль изделий.

Величина обнаруживаемого в исследуемом объекте дефекта в сильной степени зависит от размера источника излучения — фокусного пятна рентгеновской трубки. Использование для просвечивания рентгеновских трубок с фокусными пятнами диаметром 1–100 мкм позволяет получать теневые изображения объектов с прямым рентгеновским увеличением до 5–50. Применение для наблюдения теневого изображения телевизионной системы обеспечивает общее увеличение такого рентгенотелевизионного микроскопа до 500.

Для исследования быстропротекающих процессов (взрыв, детонация, динамическое уплотнение материалов, баллистические процессы, вибрация и др.) используется метод импульсной рентгенографии. Просвечивание объекта в этом случае ведется мощными импульсами излучения наносекундного диапазона длительностей. Это обеспечивает малую динамическую нерезкость снимка даже при просвечивании объектов, движущихся с большими скоростями. Для реализации этого метода используются специальные рентгеновские трубки с авто- и взрывоэмиссионными катодами.

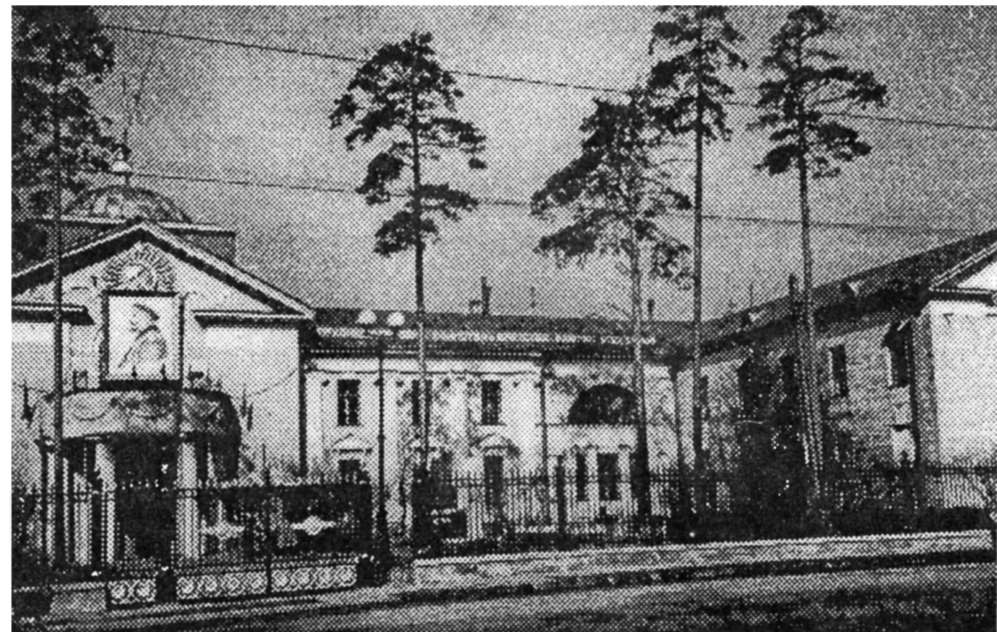
Важной областью использования импульсного рентгеновского излучения является рентгеновская локация. Применение методов рентгеновской локации позволяет измерять с высокой точностью малые расстояния между объектами. Рентгенолокационные системы используются при стыковке и посадке на Землю космических аппаратов, контроле дистанции между самолетами при полете в строю.

Одним из магистральных направлений развития микроэлектроники является уменьшение размеров элементов интегральных схем и повышение уровня их интеграции. Переход в область субмикронных размеров элементов интегральных схем возможен на основе использования новых методов литографической технологии. По оценкам специалистов, наиболее перспективным методом для промышленного производства больших и сверхбольших интегральных схем является рентгенолитография, позволяющая изготавливать приборы с шириной линии рисунка 0.1–0.2 мкм. Этот метод характеризуется достаточно высокой производительностью, малыми погрешностями передачи изображения и нечувствителен к загрязнению пластины и шаблонов. Источником длинноволнового рентгеновского излучения для литографии служат либо специальные рентгеновские трубки, либо электронные синхротроны и накопительные кольца.

Рентгеновские методы широко используются для решения такой актуальной проблемы, как определение химического состава вещества. В отличие от методов аналитической химии, пламенной фотометрии и некоторых других методов анализа состава вещества рентгеноспектральный анализ является неразрушающим, информация об элементном составе здесь получается в виде электрического сигнала, она может быть легко обработана на ЭВМ, метод обладает достаточно высокой чувствительностью и экспрессностью. Рентгеноспектральную аппаратуру часто используют в качестве датчиков химического состава в автоматизированных системах управления технологическими процессами, например процессами обогащения минерального сырья. Разновидностью этого метода является электронно-зондовый микроанализ, позволяющий осуществить локальный количественный анализ разнообразных объектов на элементы от бериллия до урана. Микроанализ позволяет также установить распределение по поверхности объекта любого из обнаруженных в нем элементов. Чувствительность микроанализа достаточно высока — 10^{-9} – 10^{-2} вес. %.

Среди методов, применяемых для исследования структуры кристаллических тел (электронография, нейтронография и др.), ведущее место занимает рентгеноструктурный анализ. Он позволяет получить исчерпывающую информацию о кристаллической решетке. В связи с широким применением кристаллов в лазерной технике, микроэлектронике, радиотехнике и других областях в последние годы резко повысился интерес к рентгенотопографическим методам исследования структуры, позволяющим выявить пространственную картину распределения дефектов в кристалле без его разрушения.

Значимость открытия Рентгена была сразу же оценена передовыми научными центрами России. В физических лабораториях Московского и Петербургского университетов, Петербургских политехнического и электротехнического институтов и др. начались исследования по изучению свойств рентгеновских лучей, в том числе на аппаратуре, изготовленной собственными силами. До 1913 г. в России своего промышленного производства трубок не было. Для медицины и научных исследований в основном использовались трубки германского производства.



Главный корпус Физико-технического института имени А.Ф.Иоффе.

1 мая 1913 г. в Петербурге было начато собственное производство рентгеновских трубок в созданной для этой цели мастерской. Качество трубок оказалось высоким и мастерская была расширена. После начала первой мировой войны, когда импорт трубок из Германии был полностью прекращен, мастерская была преобразована в первый русский завод рентгеновских трубок. В течение 1915 г. этот завод выпустил около 1000 новых трубок.

В 1923 г. производство новых и ремонт старых рентгеновских трубок осуществлялись на Электровакуумном заводе в Петрограде, который с конца 1924 г. начал выпускать электронные рентгеновские трубки. К 1927 г. качество и объем производства трубок достигли такого уровня, что спрос на эту продукцию внутри страны был удовлетворен полностью.

В 1928 г. Электровакуумный завод был объединен с заводом "Светлана". Здесь был создан оснащенный современным оборудованием мощный цех по производству рентгеновских трубок различного назначения. В дальнейшем была создана рентгеновская научно-исследовательская лаборатория, в которой были разработаны и переданы в производство новые типы трубок.

Одновременно в СССР были созданы заводы по производству рентгеновской аппаратуры для медицины, научных исследований и промышленного контроля. Организован ряд научных центров, в частности, уже в 1918 г. по инициативе группы ученых (М.И.Неменов, А.Ф.Иоффе, Д.С.Рождественский) в Петрограде был организован Государственный рентгенологический и радиологический институт. Широкое использование рентгеновских методов требовало большого количества инженерных и научных кадров. Подготовка специалистов по применению рентгеновских методов, разработке рентгеновских трубок и аппаратуры была организована в медицинских институтах, университетах и технических вузах.

Заслуга Рентгена состоит еще и в том, что он не только сделал одно из выдающихся научных открытий, но и создал свою школу физиков, передав ученикам свой блестящий опыт физика-экспериментатора. Учеником Рентгена был выдающийся советский ученый, организатор науки Абрам Федорович Иоффе. С 1903 по 1906 г. Иоффе работал в лаборатории Рентгена в Мюнхене и до конца жизни Рентгена поддерживал с ним научные связи. Он принял непосредственное участие в организации в Петрограде Государственного рентгенологического и радиологического института, из которого выделился ныне всемирно известный Физико-технический институт, носящий имя А.Ф.Иоффе.

ФТИ им.А.Ф.Иоффе стал центром физической науки в Советском Союзе; в стенах института работали и начинали свою научную деятельность многие выдающиеся советские ученые, обогатившие мировую науку своими открытиями. Достаточно назвать имена учеников академика А.Ф.Иоффе — Н.Н.Семенова и П.Л.Капицы.

Академик Н.Н.Семенов в 1956 г. был удостоен Нобелевской премии по химии за исследования механизма химических реакций. Академику П.Л.Капице в 1978 г. Нобелевская премия по физике была присуждена за открытия и основополагающие изобретения в области физики низких температур.

В Советском Союзе вклад Рентгена в мировую науку был отмечен на государственном уровне. В 1923 г. после смерти Рентгена одна из улиц Петрограда была названа его именем.

17 февраля 1928 г. в Ленинграде перед зданием Государственного научно-исследовательского рентгенорадиологического института в торжественной обстановке был открыт памятник Рентгену. В создании памятника, открытие которого было приурочено к пятилетию со дня смерти ученого, участвовали известные архитектор Н.И.Альтман и скульптор В.А.Синайский.

На церемонии открытия памятника выступил Народный комиссар просвещения А.В.Луначарский. Он сказал: «Даже малограмотные знают сейчас, какое огромное значение имеют для науки лучи Рентгена. Открытие немецкого ученого послужило тем изумительным могущественным ключом, которым были открыты совершенно новые идеи в науке и строении материи. С другой стороны, лучи Рентгена имеют огромное значение и в лечебном деле».

Наиболее точную и всеобъемлющую характеристику Рентгену как ученому дал А.Ф.Иоффе: «По своим взглядам и деятельности Рентген был типичным представителем классической физики второй половины прошлого века. Рентген более чем кто-нибудь из современников способствовал созданию новой физики нашего столетия — физики элементарных процессов и электронных явлений. . . Рентген высоко ценил лучших представителей “новой физики” Томсона, Резерфорда, Милликана, Зоммерфельда, Эйнштейна, Бора (последнего он даже предложил кандидатом на Нобелевскую премию), но сам он держался от нее в стороне. . . Рентген был большой и цельный человек в науке и жизни. Вся его личность, его деятельность и научная методология принадлежат прошлому. Но только на фундаменте, созданном физиками XIX века, в частности Рентгеном, могла появиться современная физика» [26].

С момента открытия рентгеновских лучей прошло 100 лет. За эти годы усилиями нескольких поколений физиков, инженеров, медиков были раскрыты их удивительные свойства, с их помощью были сделаны выдающиеся открытия в физике, биологии, химии, они нашли широкое применение в инженерной практике и медицине. Но представляется, что рентгеновские лучи не исчерпали все свои возможности и человечество еще будет свидетелем новых областей применения этих лучей, открытых выдающимся немецким физиком Рентгеном.

Список литературы

- [1] Handbuch der Physik. Springer Verlag, 1957.
- [2] *Röntgen W.K.* 1. Mitteilung Sitzungsber. Würzburg, 1895. 137 S.
- [3] *Röntgen W.K.* 2. Mitteilung Sitzungsber. Würzburg, 1896. Bd 11.17 S.
- [4] *Röntgen W.K.* Math. u. Naturw. Mitt a. d. Sitzungsber. preuss. Akad.-Wiss. Physik, 1897. 392 S.
- [5] *Barkla C.G., Salder C.L.* // Phil. Mag. 1907. Vol. 6 (17). P. 739.
- [6] *Friedrich W., Knipping P., Laue M.* Münchener Sitzungber. 1912. 303 S.
- [7] *Laue M.* Münchener Sitzungber. 1912. 363 S.
- [8] *Bragg W.H., Bragg W.L.* // Proc. Roy. Soc. 1913. Vol. 88A. P. 428.
- [9] *Блохин М.А.* Физика рентгеновских лучей. 2-е изд. М.; Л. 1957. 365 с.
- [10] *Mosely H.G.J.* // Phil. Mag. 1913. Vol. (6) 26. P. 1024.
- [11] *Mosely H.G.J.* // Phil. Mag. 1914. Т. 27. Вып. 6. С. 703.
- [12] *Duane W., Hunt F.* // Phys. Rev. 1915. N 6. P. 166.
- [13] *Siegbahn M.* Spektroskopie der Röntgenstrahlen. 2 Aufl. Berlin, 1931.
- [14] *Stokes G.* // Proc. Manchester Lit. a. Phil. Soc. 1898.
- [15] *Thomson J.J.* // Phil. Mag. 1898. Vol. 45. P. 172.
- [16] *Kramers H.A.* // Phil. Mag. 1923. Vol. 46. P. 836.
- [17] *Wentzel G.* // Zs. f. Phys. 1924. N 27. S. 257.
- [18] *Sommerfeld A.* // Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1929. Vol. 15. P. 393.
- [19] *Sommerfeld A.* // Ann. d. Phys. 1931. N 11. P. 257.
- [20] *Compton A.H.* // Phys. Rev. 1923 N 22. P. 409.
- [21] *П. Бикар.* Фредерик Жолио-Кюри и атомная энергия. М.: Госэнергоиздат. 1962. 219 с.
- [22] *Lilienfeld J.E.* // Fortschr. Röntgenstr. 1912. N 18. 256 S.
- [23] *Coolidge W.D.* // Phys. Rev. 1913. Vol. (2) 2. P. 409.
- [24] *Kerst D.W.* // Phys. Rev. 1941. N 60. P. 47.
- [25] *Slepian J.* USA patent 1645304. 1922.
- [26] *Иоффе А.Ф.* О физике и физиках. Статьи, выступления, письма. Л.: Наука, 1985. 544 с.