

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ ХАРЬКОВСКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени В. Н. КАРАЗИНА

З. З. Зыман
А. Ф. Сиренко

ВВЕДЕНИЕ В РЕНТГЕНОГРАФИЮ

Рентгеновские лучи и их взаимодействие с веществом

Учебное пособие

Рекомендовано Министерством образования и науки, молодежи и спорта Украины

Харьков – 2013

УДК 620.179.152.1(075.8)
ББК 22.346я73
3-96

Рецензенты:

Пугачев А. Т. – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики металлов и полупроводников Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»;

Финкель В. А. – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией материаловедения Института физики твердого тела, материаловедения и технологий ННЦ «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины;

Проценко И. Е. – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной физики Сумского государственного университета.

*Рекомендовано Министерством образования и науки, молодежи и спорта Украины
как учебное пособие для студентов высших учебных заведений
(письмо № 1/11-14968 от 25.09.2012 г.)*

Зыман З. З.

3-96

Введение в рентгенографию. Рентгеновские лучи и их взаимодействие с веществом : учебное пособие / З. З. Зыман, А. Ф. Сиренко. – Х. : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2013. – 472 с.

ISBN 978-966-623-893-4

Изложены общие и некоторые специальные вопросы возбуждения рентгеновского излучения, его поглощения и рассеяния веществом. Значительное внимание уделено рассеянию излучения объектами в различном агрегатном состоянии и твердыми растворами с различной степенью упорядочения. Рассмотрено влияние субструктуры кристалла на характеристики дифракционных линий. Изложены особенности динамического рассеяния. Содержание пособия является необходимым основанием для изучения рентгеновских методов в исследовании материалов.

Для студентов старших курсов, аспирантов и научных работников, работающих в области применения рентгеновских лучей к исследованию материалов.

УДК 620.179.152.1(075.8)
ББК 22.346я73

ISBN 978-966-623-893-4

© Харьковский национальный университет
имени В. Н. Каразина, 2013
© Зыман З. З., Сиренко А. Ф., 2013
© Дончик И. Н., макет обложки, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	8
ВВЕДЕНИЕ	15
ЧАСТЬ I. РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	28
ГЛАВА 1. СПЛОШНОЙ СПЕКТР	30
1.1. Интегральная интенсивность тормозного излучения (классическая теория)	31
1.2. Спектральная интенсивность для массивного анода (классическая теория)	36
1.3. Описание сплошного спектра для массивного анода на основании экспериментальных данных	43
1.4. Непрерывный спектр для тонкой мишени.....	52
1.5. Основы квантовой теории сплошного спектра	58
1.6. Пространственное распределение интенсивности рентгеновских лучей в сплошном спектре	66
1.7. Поляризация тормозного излучения	75
Контрольные вопросы и задания	79
ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	79
2.1. Результаты экспериментальных исследований характеристического спектра.....	79
2.1.1. Зависимость от напряжения.....	81
2.1.2. Зависимость от силы тока	85
2.1.3. Зависимость от материала анода. Закон Мозли.....	85
2.2. Закономерности в характеристических спектрах	90
2.3. Теория характеристического излучения	92
2.3.1. Строение атома по Бору–Зоммерфельду	93
2.3.2. Волновые свойства микрочастиц. Уравнение Шредингера. Правила Хунда.....	98
2.3.3. Возникновение рентгеновских спектров. Схема уровней энергии.....	111
2.4. Интенсивность линий характеристического спектра	118
2.4.1. Зависимость интенсивности спектра от напряжения на трубке ..	119
2.4.2. Относительная интенсивность спектральных линий	120
2.5. Форма и ширина спектральных линий.....	124
2.5.1. Основные представления	124
2.5.2. «Затухающий» классический осциллятор	128

2.5.3. Поле, создаваемое «затухающим» классическим осциллятором	132
2.5.4. Форма и ширина спектральной линии в классической теории	135
2.5.5. Основные представления квантовой теории	139
2.6. Некоторые дополнительные вопросы, связанные с эмиссионным спектром.....	146
2.6.1. Недиаграммные линии (сателлиты) характеристического спектра.....	147
2.6.2. Мультиплетная структура линий	150
2.6.3. Асимметрия линий	150
2.6.4. Влияние химической связи на основные линии рентгеновского спектра	153
2.6.5. Эмиссионные полосы рентгеновского спектра.....	154
Контрольные вопросы и задания.....	160

ЧАСТЬ II. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ.....

161

ГЛАВА 3. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ.....	161
3.1. Источники потерь при прохождении рентгеновского излучения через вещество	161
3.2. Коэффициент ослабления.....	163
3.3. Фотоэффект.....	169
Контрольные вопросы и задания.....	174

ГЛАВА 4. ПОГЛОЩЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ	175
4.1. Экспериментальное исследование закономерностей поглощения	175
4.1.1. Зависимость коэффициента поглощения от длины волны и атомного номера	175
4.1.2. Природа скачка поглощения	182
4.1.3. Абсорбционные спектры. Свойства края полосы поглощения.....	184
4.2. Теория поглощения рентгеновских лучей.....	191
4.2.1. Классическая теория	191
4.2.2. Квантовые представления	197
4.3. Ослабление неоднородного излучения.....	204
4.4. Прохождение через вещество очень жестких рентгеновских лучей	207
4.5. Практическое использование закономерностей поглощения рентгеновских лучей	212
4.5.1. Фильтрация непрерывного спектра.....	212
4.5.2. Селективные фильтры для характеристического излучения	213
4.5.3. Выбор излучения для съемки.....	216

4.5.4. Защита от рентгеновских лучей.....	218
4.6. Рассеяние рентгеновских лучей.....	222
4.6.1. Классическое рассеяние	222
4.6.2. Квантовое рассеяние	229
а) Эффект Комптона	229
б) Элементарная теория эффекта Комптона	231
в) Исследование электронов отдачи	237
г) Рассеяние на связанных электронах	239
4.6.3. Коэффициент рассеяния	243
Контрольные вопросы и задания.....	247
ГЛАВА 5. ВТОРИЧНАЯ ЭМИССИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ	248
5.1. Явление вторичной эмиссии	248
5.2. Интенсивность флуоресценции	250
5.3. Зависимость интенсивности флуоресценции от длины волны возбуждающего излучения.....	256
5.4. Зависимость интенсивности флуоресценции от напряжения на рентгеновской трубке.....	260
5.5. Зависимость интенсивности флуоресцентного излучения от геометрических условий	264
5.6. Дополнительные замечания об особенностях вторичных спектров.....	270
5.7. Применение вторичных спектров.....	275
Контрольные вопросы и задания.....	281
ГЛАВА 6. ОПТИКА РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ.....	282
6.1. Преломление и отражение рентгеновских лучей.....	282
6.1.1. Уравнение Вульфа–Брэгга и преломление рентгеновских лучей.....	283
6.1.2. Методы определения коэффициента преломления	287
6.1.3. Полное внешнее отражение рентгеновских лучей	289
6.2. Аномальная дисперсия рентгеновских лучей	291
Контрольные вопросы и задания.....	294
ЧАСТЬ III. РАССЕЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ МАКРОСКОПИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ	295
ГЛАВА 7. РАССЕЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ ГАЗАМИ, ЖИДКОСТЯМИ И АМОΡФНЫМИ ТЕЛАМИ	295
7.1. Рассеяние изолированным атомом. Атомный множитель.....	295
7.2. Некогерентное рассеяние	301
7.3. Рассеяние рентгеновских лучей беспорядочным скоплением атомов.....	303
7.3.1. Рассеяние разреженным газом.....	303

7.3.2. Рассеяние рентгеновских лучей жидкостями и аморфными телами	306
Контрольные вопросы и задания.....	310
ГЛАВА 8. РАССЕЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ КРИСТАЛЛАМИ ...	311
8.1. Основы кинематической теории рассеяния.....	311
8.1.1. Рассеяние кристаллами с примитивной решеткой. Интерференционная функция	312
8.1.2. Интерференционная функция в обратном пространстве.....	321
8.2. Множители интенсивности в кинематической теории рассеяния	324
8.2.1. Структурный множитель.....	324
8.2.2. Множитель повторяемости	330
8.2.3. Интегральная интенсивность интерференционных максимумов. Множитель Лоренца	332
8.2.4. Множитель поглощения	342
8.2.5. Тепловой (температурный) множитель	346
8.3. Тепловое диффузное рассеяние	354
Контрольные вопросы и задания.....	360
ГЛАВА 9. РАССЕЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ ТВЕРДЫМИ РАСТВОРАМИ	361
9.1. Рассеяние рентгеновских лучей твердыми растворами с дальним порядком	362
9.2. Рассеяние модулированными (квазипериодическими) структурами	367
9.3. Диффузное рассеяние рентгеновских лучей твердыми растворами.....	370
9.3.1. Общая характеристика диффузного рассеяния твердыми растворами	370
9.3.2. Ближнее упорядочение и его характеристики	371
9.3.3. Диффузное рассеяние твердыми растворами с ближним упорядочением	374
9.3.4. Определение коэффициентов ближнего порядка	377
9.4. Малоугловое рассеяние рентгеновских лучей	381
Контрольные вопросы и задания.....	389
ГЛАВА 10. ВЛИЯНИЕ СУБСТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛА НА ФОРМУ, ШИРИНУ И ПОЛОЖЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ЛИНИЙ	390
10.1. Определение истинной формы интерференционных линий	390
10.2. Гармонический анализ формы интерференционных линий. Метод Уоррена–Авербаха	393
10.3. Методы аппроксимации	401
10.4. Дифракционные эффекты, обусловленные дефектами упаковки.....	403

10.5. Дифракция в широко расходящемся пучке. Рентгенограммы Коссея.....	410
Контрольные вопросы и задания.....	416
ГЛАВА 11. ДИНАМИЧЕСКАЯ ДИФРАКЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ	416
11.1. Динамическая теория Дарвина	417
11.1.1. Первичная экстинкция.....	424
11.2. Основы динамической теории Эвальда–Лауэ	427
11.2.1. Основные уравнения теории	428
11.2.2. Одноволновое поле	432
11.2.3. Двухволновое поле.....	433
11.2.4. Волновое поле в непоглощающем кристалле	437
11.2.5. Волновое поле в поглощающем кристалле (феноменологическое описание)	440
11.2.6. Интерференция волновых полей в поглощающем кристалле....	442
11.2.6.1. Аномальное прохождение. Эффект Бормана.....	442
11.2.6.2. Маятниковое решение динамической задачи	446
11.2.7. Интенсивности прошедшего и отраженного пучков в функции толщины кристалла и коэффициента поглощения.....	449
11.2.8. Практические приложения динамической теории рассеяния	453
Контрольные вопросы и задания.....	457
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	458
I. Обобщенные и нормальные координаты. Нормальные колебания.....	458
II. Разложение функций в ряд Фурье. Интеграл и преобразование Фурье	460
III. Зоны Френеля при косом падении первичного пучка на отражающую плоскость.....	462
IV. Основные формулы векторного анализа	464
V. Некоторые характеристики возбуждения и поглощения К-серии ряда элементов	466
VI. Ослабление К-излучения ряда элементов некоторыми поглотителями	467
ЛИТЕРАТУРА	468

ПРЕДИСЛОВИЕ

Для студентов высших учебных заведений, специальность которых предусматривает широкое использование методов, связанных с применением рентгеновских лучей, обязательным является изучение курса, содержание которого в той или иной степени соответствует содержанию данной книги. Это курс, в котором излагаются вопросы, относящиеся к получению рентгеновских лучей, их общим свойствам и взаимодействию с веществом. Он может быть самостоятельным: в учебных планах ряда специальностей это именно так, или являться частью какого-либо обширного курса, представляя один из его первых разделов (например, курса рентгеноструктурного анализа). Существо дела от этого не меняется, будущий специалист – рентгеноструктурщик, рентгеноспектральщик или рентгенодефектоскопист – обязательно должен изучить вопросы, которые указаны выше.

Естественным следствием этого является необходимость иметь соответствующие учебник или учебное пособие, которых в настоящее время нет.

Учебник по отмеченным вопросам на русском языке не издавался, по-видимому, никогда. Правда, книга одного из видных советских рентгенистов М. И. Корсунского «Физика рентгеновых лучей» [1], хотя и не является формально учебником, все же достаточно близка к нему по стилю и методу изложения; она успешно заменяла его для студентов, учившихся до войны и в первые послевоенные годы. Но книга не издавалась после 1936 года, превратилась в библиографическую редкость и, реально, недоступна для студентов. И, что еще важнее, – она сильно устарела по содержанию, ибо, будучи написанной на очень современном для своего времени уровне, не могла за 75 с лишним лет не превратиться во многих разделах в нечто архаичное и по подходу ко многим явлениям, и по стилю, и даже по терминологии (что видно уже из названия).

Вторая книга, содержание которой охватывает нужный круг вопросов, – монография М. А. Блохина «Физика рентгеновских лучей» [2]. Однако рекомендовать ее студентам, в общем, тоже нельзя. Во-первых – это совсем не учебник, а именно монография, написанная крупнейшим специалистом, который творчески развил многие освещаемые в ней вопросы и излагает их на уровне, зачастую не очень доступном для студентов; да и сам объем книги (почти 30 печатных листов) сильно превышает возможности, ко-

торые разумны с точки зрения количества часов, обычно отводимых на подобный курс. Во-вторых, она также не переиздавалась более 50 лет (последнее издание – 1957 год), и к ней (хоть и в меньшей степени) относится сказанное выше о книге М. И. Корсунского. Таким образом, эта монография также не заполняет имеющегося «вакуума» в рассматриваемых учебных пособиях для студентов, которые специализируются в области физики твердого тела и многих, связанных с ней, инженерно-физических специальностях.

Всю остальную литературу можно разделить на две части.

Прежде всего, это обстоятельные монографии, состоящие из обзоров по различным проблемам физики, техники и применения рентгеновских лучей, написанных ведущими специалистами (например, сборник [3]). Или монографии, целиком посвященные какому-либо одному вопросу, занимающему в обсуждаемом курсе не более главы; он излагается в них подробно, на высоком уровне, с описанием оригинальных экспериментов, технических приложений и т. д. Такова, например, монография Н. Ф. Лосева «Количественный рентгено-спектральный флуоресцентный анализ» [4].

Конечно, составив «библиотеку» из таких книг и выбрав из каждой главное и принципиальное, что относится к содержанию обсуждаемого пособия, можно изучить курс на очень высоком уровне; но это проблематично для студента и, по-видимому, трудно осуществимо для большинства преподавателей.

Во-вторых, – это руководства по общим курсам рентгенографии и рентгено-структурного анализа, содержащие небольшие вводные главы справочного характера о рентгеновских лучах (например, [5–11]). Естественно, что роль этих глав чисто вспомогательная. Они даются авторами в объеме, который необходим для последующего изложения «основного» материала, и для обстоятельного изучения указанных вопросов они не могут быть рекомендованы.

Целесообразно поэтому издание учебного пособия, целиком посвященного физическим принципам получения и регистрации рентгеновских лучей, их свойствам, взаимодействию с веществом, а также возможностям использования для структурного и спектрального анализов, дефектоскопии и других приложений в физических исследованиях.

Исходя из изложенных соображений, и была написана эта книга. Основой для нее послужили лекции, которые в разное время читали авторы студентам физического факультета Харьковского университета специализаций «рентгеноструктурный анализ», «рентгенметаллофизика», а затем специальности «физика твердого тела» в качестве вводного и специальных курсов.

Несмотря на этот многолетний опыт, перед авторами при подготовке данного пособия возник ряд вопросов, допускавших разные решения.

1. Прежде всего, следовало определиться со структурой пособия, причем не в смысле круга вопросов, в нее входящих (он является достаточно традиционным), а в отношении объема и методологии изложения. Дело в том, что пособие рассчитано на студентов III–IV курсов, которые уже должны иметь обстоятельную подготовку в области математики, оптики и атомной физики. Если считать, что это так, и студенты готовы применить имеющиеся знания к усвоению нового материала, то естественно сократить содержание пособия до нескольких десятков страниц и прочитать курс за несколько лекций. Ясно, что этот идеальный вариант невозможен – такой курс не будет воспринят аудиторией, ибо очень многие посылки, предполагаемые известными, казались бы ей совершенно неизвестными. Второй крайний путь – исходить из того, что «никто ничего не знает», и излагать каждый вопрос с самого начала. Это также не реально – пришлось бы написать и прочесть весьма объемный курс, включающий в себя большое количество и физических, и математических вопросов, с которыми неразрывно связаны задачи физики и применения рентгеновских лучей.

Авторы выбрали (как обычно делается в таких случаях) некоторый компромиссный путь, в довольно широких пределах изменяя методологию изложения. Известным приближением была в этом смысле книга Э. В. Шпольского «Атомная физика» [12], которая представляется оптимальным вариантом. Обычный студент может ее читать, не обращаясь к другим учебникам для восстановления в памяти забытого – все излагается здесь почти заново, и вместе с тем – почти не встречая повторения ему хорошо известного.

Конечно, выбор того или иного подхода – дело чисто субъективное, и нет гарантий, что точка зрения авторов правильна. Тем не менее, они исходили из своего опыта преподавания как курсов физики рентгеновских лучей и рентгеноструктурного анализа, так и курса общей физики. Этот опыт подсказал им, что, например, решение уравнения для механических колебаний при наличии силы трения – вещь, органически усвоенная, вошедшая в «плоть и кровь»; обращение к нему при рассмотрении «лучистого трения» как некоторой аналогии – поможет читателю воспринять этот новый вопрос как почти известный и легко его усвоить. А представление функций в виде интеграла Фурье обычно плохо усваивается и забывается – здесь следует подробно, хотя бы качественно, без излишней математики, изложить суть дела.

К сожалению, следовать такой точке зрения абсолютно последовательно авторы не смогли – это требовало бы очень большого

объема книги. Встречаются, поэтому, тривиальные обороты типа «как известно из электродинамики» – со следующей дальше формулой, хотя полной уверенности в том, что это действительно известно (а не только должно быть известно), не было. Однако авторы старались, чтобы таких случаев было как можно меньше.

2. Обсуждаемые содержание и объем курса имеют еще один аспект. Возможны две предельные точки зрения: замкнуться в чистой физике, не занимаясь практическими приложениями изучаемых в курсе явлений и эффектов, и, наоборот, – обстоятельно развить эти приложения. Первая точка зрения опасна именно из-за такой замкнутости. Здесь читатель (слушатель) может потерять интерес к курсу, не видя четко, для чего собственно изучать все эти явления и эффекты и, что еще важнее, он не сможет оценить практическую важность каждого из них. Во втором случае реальна опасность подменить данным курсом последующие – те, для которых он должен быть преимущественно вводным. Так, рассеяние рентгеновских лучей должно излагаться в курсе «физика рентгеновских лучей». Но практический выход отсюда – по существу, весь рентгено-структурный анализ, так что слишком «увлекаясь» описанием рассеяния, можно весь этот анализ и изложить.

В общем, авторы заняли в этом вопросе позицию, промежуточную между указанными крайними точками зрения, но все же разместили ее не точно посередине, а немного «сдвинули» ко второму варианту. Причины этой сдвижки таковы:

а) курс предназначен для будущих физиков-экспериментаторов и инженеров. Такой аудитории (особенно – второй ее части) зачастую «не хочется» изучать вещи, прикладное значение которых не ясно, и именно изложением практических возможностей можно существенно повысить ее энтузиазм.

б) большей части физиков свойственно непонимание того, насколько длителен и тяжок путь от выяснения физического принципа до создания технического устройства или метода, на этом принципе основанного. Им кажется, что после того, как получен базовый результат и, тем более, – написано уравнение, делать больше нечего. Поэтому они, с одной стороны, недооценивают усилия физиков-прикладников и инженеров-разработчиков или наладчиков, а с другой – иногда пасуют перед трудностями, которые надобно преодолеть им самим при необходимости вступить на этот путь и пройти его.

В связи с этим авторы стремились на нескольких примерах показать, чем отличается заверченный, годный для научного исследования (и, тем более, применения в технических задачах) метод от положенного в его

основу принципа, – а для этого нужно было об этом методе достаточно сказать;

в) традиционная система обучения рентгенщиков привела к резкой изолированности специалистов разного профиля, в частности, – рентгено-структурщиков и рентгено-спектральщиков. Как правило, структурщики не знают рентгеноспектрального анализа, и наоборот. Эта ситуация не только неестественная (по сути, оба метода – стволы, выросшие из одного корня, – см. введение), но и просто вредная, особенно сейчас, когда определенно наметились возможности получения интересных результатов как раз на стыке «спектральных» и «структурных» идей. Понимая, что всю сложившуюся здесь систему обучения изменить трудно, авторы попытались несколько исправить это положение путем расширенного изложения основ этих методов, с тем, чтобы соответствующие подразделы в определенной степени оказались введением в рентгеноструктурный и рентгено-спектральный анализы и были полезны при изучении последующих спецкурсов.

3. При написании книги авторы исходили из твердого убеждения, что любой курс физики (будь то курсы физики рентгеновских лучей, физики низких температур или физики магнитных явлений) – есть, прежде всего, курс физики. Цель его – не только обучение определенному предмету, но и создание у обучаемых способа мышления, который можно назвать физико-математическим. Известно, что прогресс любой области науки и техники в значительной степени определяется тем, насколько работающие там люди обладают этим мышлением, насколько сумели им привить его в процессе образования, научив думать так, как думают физики. При подготовке инженера ответственность за эту сторону обучения, выпадающая на роль курсов физики, особенно велика: их, обычно, немного, и роль каждого из курсов в этом смысле резко возрастает. Здесь нельзя успокаивать себя тем (как это должно быть при обучении физика, когда вся процедура и атмосфера образования способствует достижению такой цели), что это сделает «кто-то другой».

Исходя из сказанного, авторы стремились изложить ряд вопросов именно в традиционном для физики стиле, определив весь успех ее развития, – сообщая читателю план изложения вопроса, уровень гипотетичности вводимых предложений и ограниченность допущений, степень доказательности расчетов и т. д.

4. Еще одно важное устремление авторов связано со следующим обстоятельством.

Требование повышения качества украинского образования с целью приближения его к мировым стандартам привели к нынешней перестройке стиля и методов высшего образования. Поскольку ключевой здесь является

задача воспитания из специалиста исследователя, то она должна решаться – особенно в университетах исследовательских – в каждом курсе, изучаемом на студенческой скамье. Необходимость решения этой задачи, в значительной степени, обусловила те особенности книги, которые упомянуты в предыдущем пункте. Она же привела к включению в ее текст некоторой дозы «исторического материала», иллюстрирующего тот путь, по которому пришлось идти для получения результата. Имелось в виду показать не только то, что сделано, но и как это сделано, какова была логика и последовательность шагов при продвижении в этом вопросе. В общем, в книге содержится попытка ввести читателя в так называемую «лабораторию творческого процесса», дать ему возможность, хоть в какой-то степени, познать (а, может быть, и освоить) психологию этого процесса.

С этой же целью авторы старались не создавать впечатления о полном благополучии в том или ином вопросе. Во многих учебных пособиях наблюдается противоположная тенденция – сделать вид, что все обстоит очень хорошо, наука совершенна, все проблемы решены и данный предмет – законченное, гармоничное и величественное сооружение. Авторы считают эту тенденцию ошибочной, поэтому в пособии не только не маскировали нерешенные вопросы, а, наоборот, – их выпячивали, стараясь четко показать, каков уровень сделанного, что далеко от совершенства, а что вообще нужно еще «начать и кончить». Таким образом (в полном соответствии с определением, принятом в современном науковедении), в пособии проводится мысль, что *наука – это не только то, что сделано, а в значительно большей степени – то, что делается.*

В этой связи в пособие включены (хотя бы в виде упоминания о них) некоторые «нетрадиционные» вопросы, разработка которых далека от завершения или вообще находится на ранней стадии.

5. В заключение коснемся вопроса об издании учебных пособий по физике рентгеновских лучей и рентгенографии украинскими авторами. Как отмечалось, хотя книга работавшего в Харькове М. И. Корсунского «Физика рентгеновых лучей» (1936 г.) формально была монографией, но ее по праву можно отнести к одному из лучших на то время учебных пособий в мировой литературе. В 1937 г. вышли в свет «Лекции по структурному анализу» Б. Я. Пинеса, профессора Харьковского университета, впоследствии дважды переизданные в существенно дополненном виде (1957 и 1967 гг) [10]. В 1959 г. издана «Рентгенографія металів» Г. П. Кушты – первое пособие для студентов вузов на украинском языке [6]. К сожалению, собственно учебная литература в отмеченной области украинскими авторами с тех пор не издавалась. Поэтому авторы надеются, что данная книга несколько заполнит эту более чем 50-летнюю брешь.

З. З. Зыман написал вводную часть и главы 1–6; в главах 1 и 5, а также разделе 2.5 использованы материалы, подготовленные И. В. Смушковым. А. Ф. Сиренко написал главы 7–11, составил приложения и выполнил общую редакцию пособия.

Авторы хорошо понимают, что многие из затронутых выше вопросов являются дискуссионными, а предлагаемые решения – спорными; тем более они будут благодарны за замечания и отзывы о материале пособия.

ВВЕДЕНИЕ

1. Когда у Фарадея спросили, какая область физических исследований видится ему наиболее перспективной, он ответил: «Смотрите в пустотную трубку». В XIX веке «пустотной» называли стеклянную откачанную трубку с двумя впаянными электродами. С ее помощью исследовали прохождение электрического тока через разреженные газы. Позже это простое устройство стали называть *разрядной трубкой* или *трубкой Ленарда*.

Время показало, что великий ученый оказался и великим провидцем. В 1869 г. Гитторф, изучая разряды в газах, открыл катодные лучи (т. е. обнаружил существование потока электронов), всесторонне исследованные затем Круксом. Ленард в 1892 г., основываясь на результатах опытов по прохождению катодных лучей через металлические фольги, впервые пришел к выводу о сложном строении «неделимых» частиц материи. Позже этот вывод воплотился в знаменитую резерфордовскую модель атома. Так при изучении газового разряда возникли начала всей современной физики.

С «пустотной» трубкой экспериментировал и Вильгельм Конрад Рентген, профессор Вюрцбургского университета в Германии, подвергая внутреннюю поверхность трубки бомбардировке пульсирующим пучком электронов. 8 ноября 1895 г. Рентген обнаружил, что даже в случае, когда трубка закрыта черным картоном, расположенный вблизи люминофор (платиносинеродистый барий) заметно флуоресцировал синхронно с разрядом через трубку. Причину этого он усмотрел в том, что под действием электронной бомбардировки в стекле возбуждались лучи какого-то нового, ранее неизвестного, вида. Рентген назвал их X-лучами («икс-лучами»). «Я прихожу к выводу, что X-лучи не идентичны катодным лучам, и что они, однако, возникают в стеклянной стенке разрядника под действием катодных лучей», – писал Рентген в одной из трех, ныне классических, работ, опубликованных в 1895–1897 гг. В честь открывателя, лучи называли *рентгеновскими* (это название не является общеупотребительным – в англоязычных странах и сейчас говорят и пишут «X-rays» – икс-лучи). Рентген сделал гораздо больше, чем многие известные открыватели, которые обычно ограничивались самим фактом открытия. Он всесторонне исследовал свойства вновь открытых лучей и установил основные из них.

1. Сильная проникающая способность – все тела пронизаемы для рентгеновских лучей; степень пронизаемости зависит от энергии излучения, толщины просвечиваемого материала и его природы: «Нетрудно показать, что все тела пропускают этот агент, но в весьма различной степени», – отмечал Рентген.
2. Световозбуждающее действие – различные вещества флуоресцируют при облучении рентгеновскими лучами (свойство, определившее сам факт открытия).
3. Фотографическое действие – как и видимый свет, рентгеновское излучение вызывает почернение фотопластинки; вследствие этого его можно регистрировать на фотопластинке.
4. Ионизационное действие – при прохождении лучей через воздух (или другие газы) возникают электрически заряженные частицы, регистрация которых позволяет судить об энергетических и других характеристиках излучения.

Кроме того, анализ работ Рентгена показывает, что он фактически «видел» вторичное (флуоресцентное) рентгеновское излучение, положил начало применению поглощения рентгеновских лучей в аналитической химии, имел четкое представление об их рассеянии, то есть об эффекте, на основе которого создан весь рентгеноструктурный анализ («Так мы приходим к представлению о том, что по отношению к X-лучам тела ведут себя так же, как мутные среды по отношению к свету»), создал первую рентгеновскую трубку (так как «высокий вакуум» в ней – это $\sim 10^{-2}$ мм рт. ст., то трубка относилась к типу *ионных*), и сделал многое другое.

Работы Рентгена, удостоенные Нобелевской премии (1901 г.), инициировали огромный поток исследований. Уже в следующем после открытия 1896 г. было выполнено сотни работ, посвященных рентгеновским лучам (называют и такое число, как 1000).

Большой интерес вызвало сообщение Рентгена среди русских физиков. А. С. Попов, известный как изобретатель радио, в январе 1896 г. занялся рентгеновскими лучами и уже через две недели после появления первой публикации Рентгена собрал первый отечественный рентгеновский аппарат. Он предложил его Военно-морскому госпиталю в Кронштадте для медицинских целей. Осуществив несложный по современным представлениям эксперимент – обнаружив дробь в теле раненого – А. С. Попов положил начало целой науке – рентгеновской диагностике, первой области практического использования рентгеновских лучей в России. Попов имел в этом направлении единомышленников и последователей. Профессор Петербургской военно-медицинской академии Н. Г. Егоров со второй половины 1896 г. регулярно использовал рентгеновский аппарат для диагностических снимков. Военврач В. С. Кравченко впервые применил

новые лучи для диагностики в условиях морского боя под Цусимой, исследовав на крейсере «Аврора» 40 раненых.

Экспериментировал с рентгеновскими лучами и профессор Харьковского университета Н. Д. Пильчиков, друг А. С. Попова, крупный русский физик. В частности, он поставил остроумные опыты по выяснению расположения источника рентгеновских лучей – «фокуса» трубки. Этим вопросом, оживленно дискутируемым в годы открытия, занимался также Б. Б. Голицын. В 1896 г. ему удалось доказать, что источником лучей, фокусом трубки, является область столкновения катодных лучей с мишенью.

На современников открытия наибольшее впечатление произвела проникающая способность рентгеновских лучей. «Прежде всего поражает, что через оболочку из черного картона, не пропускающую никаких видимых или ультрафиолетовых лучей солнца или электрической дуги, проходит некоторый агент, способный вызвать яркую флуоресценцию» – удивлялся Рентген.

Действительно, ничего подобного до того времени не знали. Напомним, что радиоактивность солей урана была обнаружена А. Беккерелем в 1896 г., т. е. в следующем году после сообщения Рентгена. Тем не менее, в последние годы на страницах украинской прессы стали появляться сообщения, что к открытию X-лучей причастен один из пионеров в области электроники и светотехники Иван Пулюй, родом из Тернопольщины. Его «флуоресцентная лампа» – по сути та же разрядная трубка – ныне хранится в техническом музее Праги. Вполне возможно, что во время светотехнических опытов «лампа» Пулюя в некоторых режимах излучала X-лучи, равно как и разрядные трубки его предшественников. Однако вопрос об авторстве открытия связан с наличием ряда признаков, которым в то время полностью удовлетворяли опубликованные результаты Рентгена.

Такое свойство рентгеновских лучей, как способность «видеть» сквозь экраны и ткани человеческого тела («видеть насквозь») – безусловно поражало человеческое воображение. Это привело как к многим курьезам (вплоть до принятия в одном из штатов США закона, запрещавшего изготовление и использование «рентгеновских биноклей», с помощью которых, по мнению законодателей штата, можно заглянуть в душу человека), так и к очень крупному техническому достижению – рентгенодефектоскопии. Это неразрушающий метод нахождения и исследования неоднородностей в объектах широчайшей природы и номенклатуры – вплоть до проводимого непосредственно «на рабочем месте» контроля отливок, поковок, проката, сварных швов и т. п. Удивляют сроки, которые понадобились, чтобы пройти путь от открытия до «внедрения» –

они исчислялись месяцами. Нам, современникам и участникам научно-технической революции, одним из главных тезисов которой является сокращение сроков прохождения этого пути, остается лишь восхититься достигнутым в этом отношении с рентгеновскими лучами.

Широкий фронт исследований и приложений проникающей способности рентгеновских лучей не оказался, однако, плодотворным для познания их физической сущности. Природа загадочного излучения в течение длительного времени оставалась нераскрытой, хотя для ее установления уже имелись принципиальные возможности. Гельмгольц еще в 1893 г., основываясь на максвелловской теории электромагнитных полей, предсказал сильную проникающую способность электромагнитных волн с малой длиной волны. Тем не менее, установление природы рентгеновского излучения пошло по совершенно другому пути.

2. По сути это путь, который за сто и более лет до этого был использован для доказательства волновой природы света – он основывался на изучении особенностей волновых явлений, в частности – дифракции. Важным также явилось обстоятельство, что представление об объекте, на котором должна наблюдаться дифракционная картина для коротковолнового излучения, к тому времени было подготовлено. Еще в 1885 г. великий русский кристаллограф Евграф Степанович Федоров опубликовал «Начала учения о фигурах», а в 1890 г., за 5 лет до открытия Рентгена, – этот труд в более полном изложении – «Симметрия правильных систем фигур». Правильные внешние формы кристаллов Федоров связал с правильным (упорядоченным) расположением частиц (атомов) в них, т. е. с наличием «пространственной решетки». Используя геометрические подходы, Федоров доказал возможность существования 230 типов таких решеток; впоследствии они получили название *пространственных*, или *федоровских групп*. Следует отметить, что вскоре, в 1891 г., была опубликована работа Артура Шенфлиса, профессора Гёттингенского университета в Германии, «Кристаллографические системы и кристаллографические структуры». А. Шенфлис работал в тесном контакте с Е. С. Федоровым – между ними велась оживленная переписка. Он доказал существование 230 пространственных групп алгебраическим методом, используя теорию групп. Однако сам Шенфлис подчеркивал приоритет Федорова в этом вопросе, так что пространственные группы по справедливости называют федоровскими.

Характерные расстояния для пространственных решеток ожидалось порядка размера атома $\sim 10^{-8}$ см. Следовательно, на пространственной решетке (т. е. на кристалле) должна наблюдаться дифракция волн с длиной такого же порядка – как на искусственно изготовленной дифракционной решетке с периодом $\sim 10^{-4}$ см наблюдается дифракция

обычных световых волн, имеющих соизмеримую длину (напомним, что длина волны видимого света лежит в интервале $0,4-0,8 \cdot 10^{-4}$ см).

По-видимому, исходя из подобных соображений, в 1910 г., великий русский физик П. Н. Лебедев в кружке, который он создал в Московском университете, поставил задачу – проверить предположение об электромагнитной коротковолновой природе рентгеновских лучей путем обнаружения их дифракции на достаточно совершенном монокристалле. Лебедев, вероятно, хорошо понимал, что интенсивность дифрагированных лучей будет намного меньше, чем первичного рентгеновского излучения, падающего на кристалл. Поэтому для наблюдения дифракции нужно обладать очень мощным источником первичного излучения. Таковым тогдашние разрядные (ионные) трубки не были, и Лебедев одновременно предложил изготовить рентгеновскую трубку, работающую по новому принципу. Поток электронов предполагалось получить в ней в результате термоэлектронной эмиссии, способной дать очень мощный поток, который, в свою очередь, должен был возбудить и мощное рентгеновское излучение. Успешно начатые в 1911 г. работы в обоих направлениях были, к сожалению, прекращены из-за ухода Лебедева из университета в знак протеста против действий реакционного министра просвещения. Безвременная смерть замечательного русского физика (Лебедев умер в 1912 г., сорока шести лет от роду) привела к тому, что эти опыты впредь не возобновлялись.

Вторая из лебедевских идей – создание трубки нового типа – была реализована Кулиджем в 1913 г. Кулидж довольно скромно (по-видимому, излишне скромно) оценивал свои заслуги, указывая, что «идея использования накаливаемого катода в рентгеновской трубке была не нова, но ... этот принцип еще никогда не применялся при вакууме настолько высоком, что положительные ионы не играли существенной роли». Этим Кулидж как бы сводил свою работу к решению чисто технической задачи получения высокого вакуума в трубке. Однако это был выдающийся результат: до сих пор, то есть через 100 лет, этот тип трубки является, фактически, единственным, применяемым во всей рентгеновской аппаратуре!

Что же касается первой из указанных задач – то она была решена в 1912 г., когда Макс фон Лауэ поручил своим сотрудникам В. Фридриху и П. Книппингу осуществить опыт по дифракции рентгеновских лучей на кристалле, и они получили картину, которую теперь называют *лауэграммой*. Этот опыт и стал экспериментальным доказательством гипотезы, что рентгеновские лучи представляют собой электромагнитные

волны, то есть имеют ту же природу, что и свет, но существенно меньшую длину волны – порядка 1Å^1 .

Измерения позволили установить место рентгеновских лучей на шкале электромагнитных волн. Под «рентгеновскими» определили волны, занимающие на этой шкале место между ультрафиолетовыми лучами и гамма-лучами радиоактивного распада, с длинами от 800Å ($8 \cdot 10^{-6}\text{ см}$) до $0,0001\text{Å}$ (10^{-12} см), т. е. охватывающими около семи порядков. Конечно, эти границы очень условны: излучение с некоторой длиной волны можно нередко отнести как к одному, так и к другому виду, и его называют так или иначе в зависимости от происхождения. Так, если излучение получает рентгенщик, бомбардируя мишень электронами, ускоренными напряжением около 410 кВ – считается, что получено рентгеновское излучение с $\lambda = 0,003\text{Å}$. Если такую же длину волны наблюдает ядерщик, изучающий превращение $\text{J}^{130} \rightarrow \text{Xe}^{130}$, он полагает, что это гамма-лучи. Так же «размазана» граница между рентгеновскими и ультрафиолетовыми лучами.

«Лауэ и его коллеги показали, что дифракционные картины, получаемые ими при взаимодействии рентгеновских лучей с кристаллами, естественно объясняются предположением о существовании очень коротких электромагнитных волн... Пятна этих картин представляют собой интерференционные максимумы волн, дифрагированных периодически расположенными атомами кристалла», – писал Брэгг.

После опыта Лауэ оставалось только «оформить» полученные результаты математически – т. е. написать соответствующее уравнение, определяющее положение дифракционных максимумов. Было ясно, что это уравнение должно быть очень похоже на известную формулу дифракционной решетки $n\lambda = L \sin \varphi$, где λ – длина волны падающего на решетку света, L – период решетки (расстояние между серединами соседних щелей), φ – угол между направлением первичного луча и луча, дающего дифракционный максимум n – го порядка. Вопрос состоял лишь в том, как изменится эта формула с учетом имеющихся в рентгеновском случае особенностей (в частности, создаваемых тем обстоятельством, что дифракция рентгеновских лучей происходит на кристалле, т. е. трехмерной решетке, в то время как приведенная формула относится к обычно используемой в оптике одномерной решетке).

Сам М. фон Лауэ вспоминает об этом так. «В глубокой задумчивости шел я домой... после того как Фридрих показал мне эти снимки, и уже

¹ Напомним, что, по исторически сложившимся обстоятельствам, для измерения длин волн рентгеновских лучей применяется «специальная» единица, *икс*, обозначаемая «X», а также единица, в тысячу раз большая, *килоикс* (кX) – такая, что $1\text{ кX} = 1,00202\text{Å}$. Хотя отличие здесь и очень небольшое, но, при имеющейся точности измерений, оно существенно.

вблизи моей квартиры мне пришла в голову мысль о математической теории этого явления. Мне надо было только учесть наличие трех периодов пространственной решетки, чтобы объяснить новое открытие. Наблюдаемый венчик интерференционных лучей (рефлексов) удалось хорошо связать с каждым из трех условий интерференции, взятым в отдельности».

Однако, помимо обстоятельной теории Лауэ, огромное значение для понимания природы рентгеновских лучей и – что особенно важно – их дальнейшего широкого использования сыграли работы У. Г. и У. Л. Брэггов (отец и сын). В 1913 г., вскоре после опыта Лауэ с сотрудниками, они показали, что появление рефлексов на фотоматериале можно объяснить как отражение падающего луча от атомных плоскостей кристалла по закону геометрической оптики. Независимо от Брэггов к такому же заключению пришел профессор Московского университета Г. В. Вульф. Написанное ими выражение, известное сейчас как *уравнение Вульфа–Брэгга*², имеет вид действительно очень похожий на формулу дифракционной решетки:

$$n \lambda = 2d \sin \theta,$$

где θ – угол между какой-либо кристаллографической плоскостью и падающим на кристалл рентгеновским пучком (ему же равен угол между плоскостью и дифрагированным пучком), d – расстояние между соседними отражающими кристаллографическими плоскостями (так называемое *межплоскостное расстояние*).

Из этого уравнения следуют два важнейших приложения, каждое из которых определяется тем, что считать в уравнении известным, а что неизвестным.

Если при данном значении угла θ наблюдается дифракция на кристалле с известным значением d при условии, что на образец падает рентгеновское излучение с неизвестной длиной волны λ , – то это формула для нахождения λ , т. е. для получения характеристики рентгеновского излучения.

Если же, наоборот, λ – известная величина, а d – неизвестная, то при тех же условиях из формулы Вульфа–Брэгга определяется d – характеристика структуры кристалла. Первая из указанных возможностей (если говорить о принципиальной стороне) – это то, что называют *рентгено-спектральным анализом*, вторая – *рентгеноструктурный анализ*. Таким образом, в уравнении Вульфа–Брэгга «содержатся» одновременно и рентгеноспектральный и рентгеноструктурный анализы – два исключительно мощных и результативных метода, без существования

² В довоенной литературе оно нередко называется уравнением Вульфа–Брэггов.

и развития которых невозможно представить себе всю современную науку и технику.

Первый из них был заложен в том же 1913 году, когда Брэгги создали так называемый *рентгеновский спектрометр* – прибор, сыгравший огромную роль в развитии физики рентгеновских лучей и являющийся (в той или иной модификации) и сейчас основным в спектральном анализе.

Прибор, работающий во втором варианте, обычно называют *дифрактометром*. Информация, которую он дает (набор межплоскостных расстояний и интенсивность для каждого из них) – это основа для проведения структурного анализа, т. е. определения структуры кристалла, в конечном счете – определения положения атомов в его элементарной ячейке.

После создания спектрометра естественно возникла задача определения «наборов» длин волн, характерных для различных элементов. «Первая проблема, которую мы должны разрешить, ... состоит в измерении и анализе групп волн, испускаемых атомами 92-х элементов», – писал К. Зигбан, один из основателей рентгеноспектрального анализа. Уже после частичного решения этой задачи была обнаружена закономерность, связывающая длины волн (или частоты), испускаемые данным элементом, с его атомным номером (закон Мозли). Получен был также очень впечатляющий результат: открыты элементы, предсказанные еще Менделеевым (напомним, что для них в его таблице оставались «пустые места»): в 1923 г. Хевеши и Костер открыли 72-й элемент, гафний, а в 1925 г. Ноддак открыл 75-й элемент, рений.

Не менее бурно, чем рентгеноспектральный, развивался рентгеноструктурный анализ. С его помощью была установлена структура огромного числа кристаллов, причем во всех случаях блестяще подтвердились теоретические выводы Федорова. Одновременно началось развитие того, что называют *прикладным рентгеноструктурным анализом* – т. е. определение не «геометрически идеальной» структуры кристалла, а отклонений от нее, в частности – изучение дефектов строения кристаллической решетки реальных – природных или искусственно выращенных – кристаллов.

О том «весе», который имели тогда исследования в этой области науки, и о том значении, которое придавалось полученным результатам, говорит тот факт, что в первой половине XX века 8 рентгеников были удостоены Нобелевских премий: В. Рентген, 1901 г. – за открытие лучей, которые носят его имя; М. Лауэ, 1914 г. – за открытие дифракции рентгеновских лучей; У. Г. и У. Л. Брэгги, 1915 г. – за крупный вклад в изучение структуры кристаллов с помощью рентгеновских лучей; Ч. Баркла, 1917 г. – за открытие характеристического излучения рентге-

новских лучей; К. Зигбан (Сигбан), 1924 г. – за спектроскопические исследования в диапазоне рентгеновских лучей; А. Комптон, 1927 г. – за открытие эффекта квантового рассеяния рентгеновских лучей, который носит его имя; П. Дебай, 1936 г. – за исследования дифракции рентгеновских лучей и электронов в газах. Во второй половине XX столетия за выдающиеся достижения в изучении биологического воздействия рентгеновских лучей, расшифровке структуры сложных биорганических соединений методами рентгеноструктурного анализа и его развитие Нобелевскими премиями были удостоены: Г. Мёллер, 1946 г. – за открытие возникновения мутаций под воздействием рентгеновских лучей; Ф. Крик, Д. Уотсон, М. Уилкинсон, 1962 г. – за установление молекулярной структуры нуклеиновых кислот и ее роли в передаче информации в живой материал; Д. Кендрю, М. Перуц, 1962 г. – за исследование структуры глобулярных белков; Д. Кроуфут-Ходжкин, 1964 г. – за определение методом рентгеноструктурного анализа строения веществ, имеющих биологическое значение; Дж. Карл и Г. А. Хауптман, 1985 г. – за выдающиеся достижения в разработке прямых методов определения структуры кристаллов; Дж. Дизенхофер, Р. Губер и Х. Митчел, 1988 г. – за исследование структуры протеинов, ответственных за фотосинтез.

В итоге 13 Нобелевских премий, связанных с открытием, исследованием и применением рентгеновских лучей, – случай, пожалуй, беспрецедентный в истории науки.

3. В республиках бывшего Советского Союза рентгеновские исследования начались весьма интенсивно вскоре после 1917 г. О значении, которое им придавалось, говорит хотя бы тот факт, что один из первых научно-исследовательских институтов, организованных в стране, так и назывался – Рентгеновский институт, и лишь впоследствии (после развертывания в нем других работ) он был переименован в Физико-технический. Основатель и многолетний директор этого знаменитого Ленинградского физико-технического института АН СССР (который в значительной степени является колыбелью советской физики вообще) А. Ф. Иоффе в течение нескольких лет работал у самого Рентгена, и соответствующее направление в физике было ему близким. В результате этого, в институте были выполнены не только фундаментальные исследования, относящиеся собственно к физике рентгеновских лучей (к примеру, работы по фотоэффекту П. И. Лукирского, исследования преломления и полного внешнего отражения рентгеновских лучей от различных веществ В. п. Линника и В. Е. Лашкарева и от тонких слоев металлов А. И. Алиханова и Л. А. Арцимовича), но и заложено основание развитию рентгеноструктурного анализа в его различных направлениях. Достаточно отметить ставшие классическими работы Б. К. Вайнштейна,

Г. С. Жданова, В. И. Данилова, З. Г. Пинскера, А. И. Китайгородского, Б. Я. Пинеса и многих других исследователей, которые получили всемирное признание.

Не менее существенными были и результаты в области рентгено-спектрального анализа, представленные в работах И. Б. Боровского, М. А. Блохина, Э. Е. Вайнштейна, В. Н. Протопопова, Е. Л. Кострикова, Н.Ф. Лосева, и др.

Широкое развитие рентгеновских научных центров (вызванное, в первую очередь, потребностями различных, в том числе новейших, отраслей техники) привело за одно-два десятилетия к достижению очень существенных результатов во всех направлениях использования рентгеновских лучей.

В рентгеноспектральном анализе в его прикладном аспекте удалось не только добиться значительного увеличения чувствительности и точности, но и осуществить в различных отраслях промышленности непрерывный контроль технологических процессов на производстве с немедленной обратной связью, что позволяло автоматизировать процессы.

Методы этого анализа оказались весьма плодотворными и в решении ряда научных вопросов, связанных с распределением электронов по энергетическим состояниям в твердых телах, жидкостях и газах, при изучении различных свойств вещества – магнитных, электропроводности, люминесценции, характера химической связи и т. п.

Большим достижением здесь явилось создание методов локального анализа, позволяющего определить химический состав в объемах порядка 10^{-12} см^3 .

В рентгеноструктурном анализе теперь, по сути, нет ограничений для структуры, которую необходимо расшифровать – любые органические и биологические вещества, содержащие тысячи атомов в «элементарной ячейке», успешно исследуются при помощи автоматических рентгеновских дифрактометров, имеющих выход на компьютер. Прикладной рентгеноструктурный анализ достиг очень высокой чувствительности в изучении весьма тонких дефектов кристаллической решетки (например, таких, как дислокации в монокристаллах в очень широком диапазоне их плотности), в фазовом анализе, измерении параметра решетки и т. п.

Столь же успешно развивалась рентген- и γ -дефектоскопия, главным образом – за счет улучшения технической вооруженности, позволяющей теперь осуществлять ее непосредственно на строительных площадках, трубопроводных трассах, просвечивать изделия большой толщины и др.

Исследования в радиационной химии и биологии предопределили применение мощных потоков ионизирующих излучений (в том числе – рентгеновского) в технологических и медицинских целях. Это применение

основано на стимулирующем действии излучения на некоторые химические реакции (что привело, например, к созданию радиационной вулканизации резиновых изделий и радиационному сульфохлорированию) или на стерилизующем действии облучения (что находит применение в стерилизации медицинских изделий и инструмента, радиационной пастеризации пищевых продуктов и т. п.). Применяются предпосевное облучение семян с целью повышения урожайности, облучение с целью создания мутации гена, лечение облучением злокачественных опухолей и т. д.

Иногда рентгеновские лучи находят неожиданное применение: в археологии – при выявлении подделок старинных изделий, в живописи – для обнаружения первичных картин под более поздними или в криминалистике.

4. Достижение высоких научных результатов требует соответствующего уровня приборного обеспечения. К физике рентгеновских лучей это относится в степени значительно большей, чем существующая в этом отношении «средняя норма». Рентгеновская техника в бывшем СССР начала создаваться с середины 20-х годов и далее заметно развивалась в годы предвоенных пятилеток. Среди пионеров в области разработки и производства были В. А. Витка и А. И. Тхоржевский (рентгеновские аппараты), Ф. Н. Хараджа (рентгеновские трубки), Д. Б. Гогоберидзе (рентгеновский спектрограф). Дело не ограничивалось обычной разработкой, соответствующей тогдашнему техническому уровню аппаратуры. Исследователи предложили и осуществили новые, весьма инновационные по тем временам, идеи (Л. В. Альтшуллер и В. А. Цукерман разработали схемы «импульсной рентгенографии», П. И. Стрельников создал отечественный вариант рентгеновской трубки с вращающимся анодом).

Тем не менее, в общем, и тогда, и в первые послевоенные годы номенклатура серийно выпускаемых аппаратов была весьма ограниченной. В основном, это были аппараты для просвечивания (как технического, так и медицинского), что имело гораздо более массовое распространение, чем рентгеноструктурный и рентгеноспектральный анализы. Аппаратура для рентгеноструктурного анализа была, по сути, представлена одной установкой УРС-70. В большинстве исследовательских лабораторий сотрудники использовали самодельное оборудование, особенно – когда речь шла о сколько-нибудь новых и оригинальных задачах. При этом нередко разрабатывались незаурядные устройства, значительно превосходящие по своим данным серийную аппаратуру (например, острофокусная рентгеновская трубка Пинеса–Безверхова).

Пожалуй, заметно лучшим было положение в рентгеноспектральном анализе. Здесь М. А. Блохин не только разработал некоторые теоретические вопросы, но и оригинальные образцы аппаратов как для коротковолнового, так и для длинноволнового диапазонов (серии КРУС и ДРУС), а также сумел (что требовало тогда колоссальной организаторской работы) наладить их полусерийное производство в экспериментальных мастерских Ростовского университета. Позднее были созданы весьма удачные модели флуоресцентных рентгеновских спектрометров (К. И. Нарбутт и А. Б. Гильверг в Институте кристаллографии АН СССР и работники КБ «Цветметавтоматика»). Первые промышленные образцы современных (на то время) спектрометров начало выпускать Специальное конструкторское бюро рентгеновской аппаратуры (СКБ РА), впоследствии НПО «Буревестник». В общем, если положение с рентгеновской техникой в первые послевоенные годы нельзя было считать удовлетворительным, то ситуация резко изменилась уже к середине пятидесятых годов. В удивительно короткие сроки удалось создать вполне современные рентгеновские аппараты для рентгеноструктурных и рентгеноспектральных исследований. Наряду с традиционными источниками рентгеновских лучей были разработаны принципиально новые, в которых использовалось синхротронное излучение. Это позволило, начиная с 50-х годов, развернуть широкую сеть лабораторий, успешно выполнявших как исследовательскую, так и аналитическую работу в области рентгенографии.

Значительный вклад в рентгенографию и рентготехнику внесли украинские физики. Используя рентгенографическую методику, В. И. Данилов исследовал кинетику кристаллизации расплавленных солей, жидких металлов и сплавов, в том числе металлических эвтектик. Он установил существование в жидкой фазе ближнего порядка в расположении атомов (ионов). Новые результаты в этом направлении получили также А. Ф. Скрышевский и, позже, Я. И. Дутчак.

Широко использовал рентгенографические методы в ставших классическими исследованиях структуры мартенсита Г. В. Курдюмов, который в 1933–1951 гг. работал в Украине (ныне его имя носит Институт металлофизики НАН Украины).

В Харькове Н. Д. Борисовым и Я. М. Фогелем были выполнены первые работы по использованию вторичных рентгеновских спектров в аналитических целях. Здесь же в этой области успешно работал М. И. Корсунский и его сотрудники.

П. И. Стрельников в Украинском физико-техническом институте (УФТИ, Харьков) создал отечественный вариант рентгеновской трубки с вращающимся анодом (1936 г.). Б. Я. Пинесом и В. Д. Безверхим (УФТИ – Харьковский университет) была сконструирована разборная острофокусная

рентгеновская трубка (1946 г.). В усовершенствованном варианте (1950 г.) она имела размер фокального пятна ~ 50 мкм. Сообщение Эренберга и Спира о созданной ими острофокусной трубке (значительно более сложной конструкции) с размером фокуса ~ 100 мкм появилось в 1951 г.

Б. Я. Пинес с сотрудниками в Харьковском университете предложили новые экспериментально-расчетные методы рентгенографического определения коэффициентов гетеродиффузии в сплавах, а также субструктурных характеристик кристаллов и фазового анализа сложных соединений. М. Я. Фукс (Харьковский политехнический институт) стал одним из основоположников рентгеновской тензометрии.

В работах В. В. Немошкаленко были развиты рентгеноспектроскопические методы изучения энергетического спектра электронов в твердых телах. В теорию рассеяния рентгеновских лучей реальными кристаллами большой вклад внес М. А. Кривоглаз.

В современном мире ежегодно публикуются тысячи работ, посвященные различным аспектам исследования и применения рентгеновских лучей. Физика рентгеновских лучей и порожденные ею методы анализа (рентгенографии) – это живое древо науки, которое растет и развивается. Его дальнейшая эволюция несомненно приведет как к весомым научным результатам, так и к новым областям практического применения.