



Лекция 2. Источники электромагнитного (фотонного) излучения.

Дисциплина: Радиационные эффекты и современная спектроскопия твердого тела.

Преподаватель: Phd, и.о. доцента Мархабаева А.А.



Цель лекции

Изучить природу, классификацию и характеристики электромагнитного (фотонного) ионизирующего излучения, а также рассмотреть основные принципы действия источников рентгеновского и гамма-излучений, их энергетические диапазоны и области применения в науке и технике.

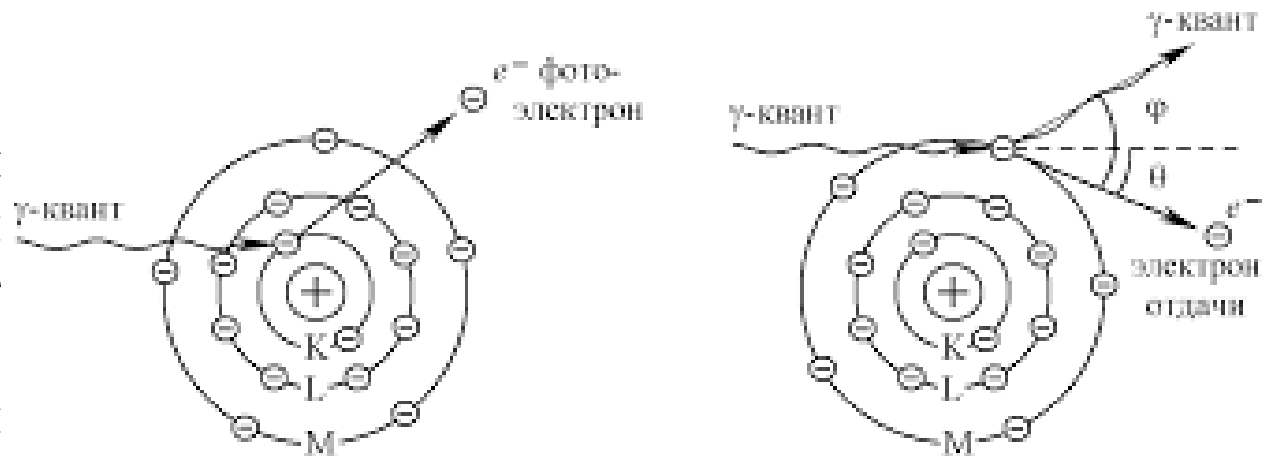
Основные вопросы лекции:

- Понятие ионизирующего излучения и механизмы ионизации вещества.
- Классификация ионизирующих излучений: фотонные и корпускулярные.
- Источники ионизирующих излучений: радионуклидные и физико-технические.
- Естественные и искусственные радионуклиды.
- Взаимодействие заряженных частиц (α , β) с веществом.
- Характеристика проникающей способности различных видов излучения.

Гамма-излучение (gamma radiation) - коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны менее 0,1 нм, которое возникает при распаде радиоактивных ядер, переходе ядер из возбужденного состояния в основное, при взаимодействии быстрых заряженных частиц с веществом, аннигиляции электронно-позитронных пар и при других превращениях элементарных частиц. В виду того, что ядра имеют только определенные разрешенные уровни энергетического состояния, спектр гамма-излучения дискретен и состоит, как правило, из нескольких групп энергий в диапазоне от нескольких кэВ до десятка МэВ.



Гамма-кванты взаимодействуют в основном с электронными оболочками атомов, передавая часть своей энергии электронам в процессе фотоэффекта и эффекта Комптона. При фотоэффекте фотон поглощается атомом среды с испусканием электрона, причем энергия фотона за вычетом энергии связи электрона в атоме передается освобожденному электрону. Вероятность фотоэффекта максимальна в области энергий квантов менее 200 кэВ, и быстро убывает с ростом энергии фотона. В случае эффекта Комптона на выбивание электрона с атомной оболочки расходуется только часть энергии фотона, а сам фотон изменяет направление движения. Комptonовское рассеяние преобладает в области энергий (0.2-5) МэВ и пропорционально атомному номеру среды.





Радионуклидные источники гамма-квантов - естественные и искусственные бета-активные изотопы, дешевые и удобные в эксплуатации. При бета-распаде нуклидов ядро - продукт распада, образуется в возбужденном состоянии. Переход возбужденного ядра в основное состояние происходит с испусканием одного или нескольких следующих друг за другом гамма-квантов, снимающих энергию возбуждения. Радионуклидные источники представляют собой герметичные ампулы из нержавеющей стали или алюминия, заполненные активным изотопом. Энергия гамма-квантов радионуклидных источников не превышает 3 МэВ.



Таблица 1.4. Радионуклидные источники гамма-излучения.

Изотоп	Название	Период полураспада	Энергия линий излучения, кэВ	Выход квантов в % на Бк
^{24}Na	Натрий-24	14,9 часа	1380; 2760	110
^{59}Fe	Железо-59	45 суток	1100; 1290	56; 44
^{60}Co	Кобальт-60	5.27 года	1170; 1330	110
^{65}Zn	Цинк-65	245 суток	1120	45.5
^{75}Se	Селен-75	127 суток	120; 136; 265; (280; 400)	15; 54; 56; 36
^{85}Sr	Стронций-85	64 сутки	513	100
^{113}Sn	Олово-113	119 суток	393	69.4
^{124}Sb	Сурьма-124	60.8 суток	610; 640-1450; 1690; 2080	100; 35; 50; 6.5
^{131}I	Йод-131	8.1 суток	360; 630-720	78; 12
^{137}Cs	Цезий-137	26.6 года	661	92
^{141}Ce	Церий-141	32.5 суток	145	67
^{192}Ir	Иридий-192	74 сутки	296-316	1.36
^{222}Rn	Радон-222	3.82 суток	241-2452	2.00



Физико-технические источники излучения представляют собой ускорители электронов, которые используются для генерации гамма-излучения. В этих ускорителях электронный поток разгоняется до энергий в несколько МэВ и направляется на мишень (цирконий, барий, висмут и др.), в которой возникает мощный поток гамма-квантов тормозного излучения с непрерывным спектром от нуля до максимальной энергии электронов.

Для создания мощных импульсных потоков тормозного гамма-излучения используются установки ЛИУ–10, ЛИУ–15, УИН–10, РИУС–5. Импульсный ускоритель РИУС-5 создает ток электронов в импульсах (0.02-2) мкс до 100 кА при энергии электронов до 14 МэВ, что позволяет создавать мощность дозы тормозного излучения до 10^{13} Р/с со средней энергией гамма-квантов порядка 2 МэВ.

Малогобаритные импульсные бетатроны типа МИБ используются для радиографического контроля качества материалов и изделий в нестационарных условиях: на монтажных и строительных площадках, при контроле сварных соединений и запорной арматуры нефте- и газопроводов, контроле опор мостов и других ответственных строительных конструкций, а также контроле литья и сварных соединений больших толщин.



Источники рентгеновского излучения.

Рентгеновское излучение по своим физическим свойствам аналогично гамма-излучению, но природа его совсем другая. Это низкоэнергетическое (не более 100 кэВ) электромагнитное излучение. Оно возникает при возбуждении атомов элементов потоком электронов, альфа-частиц или гамма-квантов, при котором происходит выброс электронов с электронных оболочек атома. Восстановление электронных оболочек атома сопровождается излучением рентгеновских квантов и имеет линейчатый спектр энергий связи электронов с ядром на электронных оболочках.

Рентгеновское излучение сопровождает также бета-распад радионуклидов, при котором ядро элемента увеличивает свой заряд на +1, и происходит перестройка его электронной оболочки. Этот процесс позволяет создавать достаточно мощные и дешевые радионуклидные источники рентгеновского излучения (таблица 1.5). Естественно, что такие источники одновременно являются источниками определенного бета- и гамма-излучения. Для изготовления источников используются радионуклиды с минимальной энергией излучаемых бета-частиц и гамма-квантов.



Таблица 1.5. Радионуклидные источники квантов низких энергий.

Изотоп	Название	Период полураспада	Энергии излучения, кэВ	Выход, %/Бк
^{55}Fe	Железо-55	2,9 года	5.9	26
^{57}Co	Кобальт-57	270 суток	6.4; 14.4; 122; 136	51; 9; 85; 11
^{109}Cd	Кадмий-109	470 суток	22.1; 88	107; 4
^{119}Sn	Олово-119	250 суток	25.2; 23.8	100; 100
^{153}Gd	Гадолиний-153	236 суток	41.5; 70; 97; 103	110; 3; 30; 20
^{170}Tm	Тулий-170	129 суток	52.3; 84	100; 3
^{241}Am	Америций-241	458 лет	14-18; 59.6; 26.4	37; 36; 3

Защита от рентгеновского излучения существенно проще защиты от гамма-излучения. Слой свинца 1 мм обеспечивает десятикратное ослабление излучения с энергией 100 кэВ.



Физико-технические источники рентгеновского излучения - рентгеновские трубки, в которых под воздействием потока электронов, разогнанных до нескольких десятков кэВ, в мишени (аноде трубки) возбуждается излучение.

Рентгеновская трубка состоит из стеклянного вакуумного баллона с впаянными электродами – катодом, нагреваемым до высокой температуры, и анодом. Электроны, испускаемые катодом, ускоряются в пространстве между электродами сильным электрическим полем (до 500 кВ для мощных трубок) и бомбардируют анод. При ударе электронов об анод их кинетическая энергия частично преобразуется в энергию характеристического и тормозного излучения. КПД рентгеновских трубок обычно не превышает 3%. Поскольку большая часть кинетической энергии электронов превращается в тепло, анод выполняется из металла с высокой теплопроводностью, а на его поверхность (под 45° к потоку электронов) в зоне фокусировки потока наносится мишень из материала с большим атомным номером, например вольфрама. Для мощных рентгеновских трубок применяется принудительное охлаждение анода (водой или специальным раствором). Удельная мощность, рассеиваемая анодом в современных трубках, от 10 до 10^4 Вт/мм². Типовой спектр излучения рентгеновской трубки приведен на рис. 3. Он состоит из непрерывного спектра тормозного излучения электронного пучка и характеристических линий рентгеновского излучения (острые пики) при возбуждении внутренних электронных оболочек атомов мишени.

Источники нейтронов.

Нейтронное излучение - это поток нейтральных частиц, имеющих массу, примерно равную массе протона. Эти частицы вылетают из ядер атомов при некоторых ядерных реакциях, в частности, при реакциях деления ядер урана и плутония. Вследствие того, что нейтроны не имеют электрического заряда, нейтронное излучение взаимодействует только с атомными ядрами среды и обладает достаточно большой проникающей способностью. В зависимости от кинетической энергии (в сравнении со средней энергией теплового движения $E_t \approx 0.025$ эВ) нейтроны условно подразделяют на тепловые ($E \sim E_t$), медленные ($E_t < E < 1$ кэВ), промежуточные ($1 < E < 500$ кэВ) и быстрые ($E > 500$ кэВ).

Процесс ослабления нейтронного излучения при прохождении через вещество складывается из процессов замедления быстрых и промежуточных нейтронов, диффузии тепловых нейтронов и их захвата ядрами среды. В процессах замедления быстрых и промежуточных нейтронов основную роль играет передача нейтронами энергии ядрам среды при прямых столкновениях с ними (неупругое и упругое рассеяние).

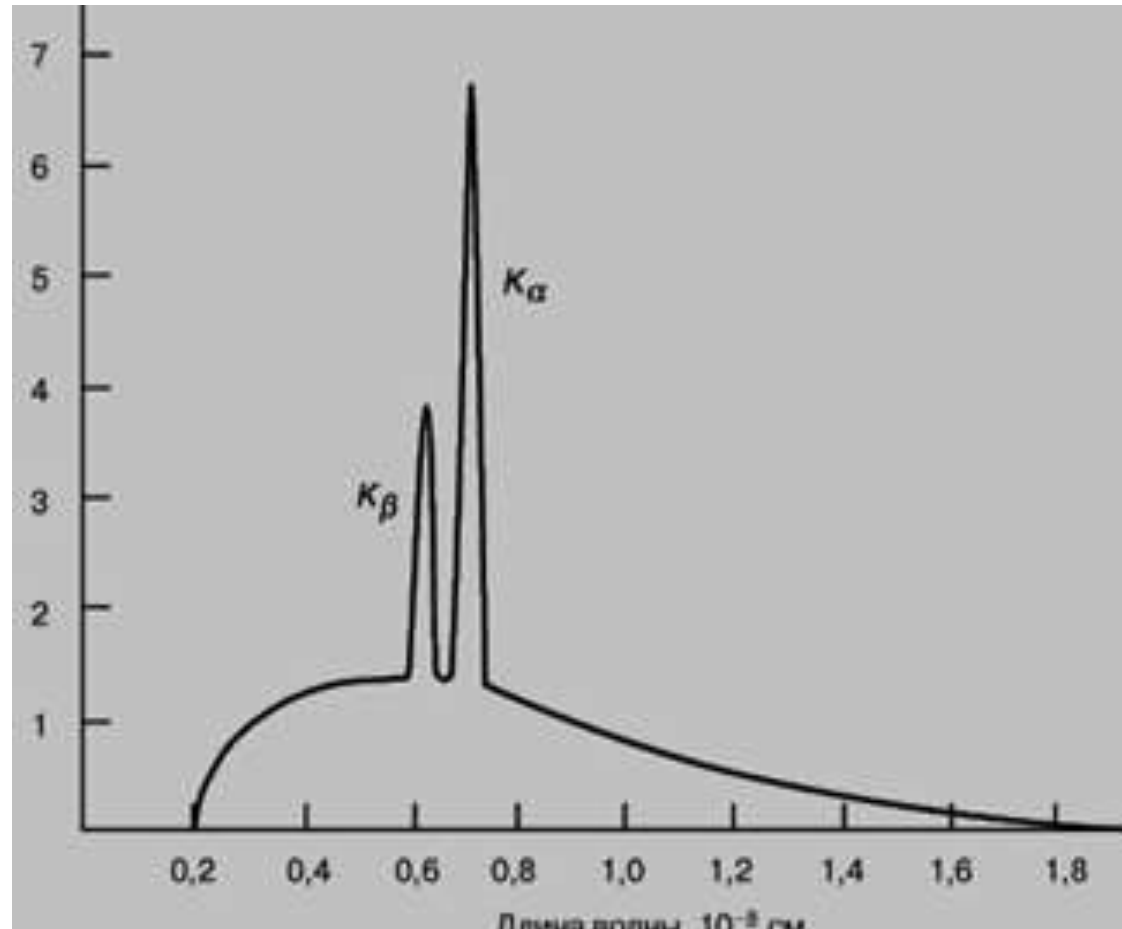


Рис. 1.2 Спектр рентгеновского излучения



Защита от нейтронов выполняется из смеси (слоев) тяжелых элементов (железо, свинец для неупругого рассеяния), легких водородо- и углеродосодержащих веществ (вода, парафин, графит – упругое рассеяние), и элементов захвата тепловых нейтронов (водород, бор). При среднем соотношении 1:4 тяжелых и легких элементов ослабление потока нейтронов в 10:100:1000 раз достигается в слоях примерно 20:32:40 см.

Из всех видов внешних воздействий на человека нейтронное излучение наиболее опасно, т.к. интенсивно замедляется и поглощается водородосодержащей средой организма и вызывает ядерные реакции в его внутренних органах.



Радионуклидные источники нейтронов (таблица 1.6) выполняются на основе возбуждения в определенных химических элементах ядерных реакций типа (α, n) - поглощение альфа-частицы \Rightarrow испускание нейтрона, или (γ, n) - поглощение гамма-кванта \Rightarrow испускание нейтрона. Они представляют собой, как правило, однородную спрессованную смесь элемента-излучателя альфа-частиц или гамма-квантов и элемента-мишени, в котором возбуждается ядерная реакция. В качестве альфа-излучателей используются полоний, радий, плутоний, америций, кюрий, в качестве гамма-излучателей - сурьма, иттрий, радий, мезоторий. Элементы - мишени для альфа-излучателей - бериллий, бор, для гамма-излучателей - бериллий, дейтерий. Смесь элементов запаивается в ампулы из нержавеющей стали.



Наиболее известными ампульными источниками являются радиево-бериллиевый и полониево-бериллиевый. Полоний-210 - практически чистый альфа-излучатель. Распад полония сопровождается гамма-излучением слабой интенсивности. Основной недостаток - небольшой срок службы, определяемый периодом полураспада полония.

В калифорниевом нейтронном источнике используется спонтанная ядерная реакция с выбросом нейтрона из ядра, которая сопровождается сильным гамма-излучением. При каждом делении ядра выделяется четыре нейтрона. 1 г источника в секунду выделяет $2,4 \cdot 10^{12}$ нейтронов, что соответствует нейтронному потоку среднего ядерного реактора. Источники имеют постоянный поток нейтронов (не требуется мониторинг), “точечность” излучения, длительный ресурс (более трех лет), сравнительно низкую стоимость. Источники тепловых нейтронов выполняются аналогично и дополнительно содержат графитовый чехол-замедлитель.

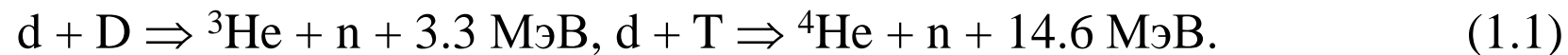


Таблица 1.6. Радионуклидные источники нейтронов.

Состав	Название	Реакция	Период полу- распада, лет	Средняя энергия, МэВ	Выход, n/3.7 10 ¹⁰ Бк
²¹⁰ Po-Be	Полоний, бериллий	⁹ Be(a,n)	0.39	4.3	1.8 10 ⁶
²³⁹ Pu-Be	Плутоний-239, бериллий	“	24360	4.5	2 10 ⁶
²³⁸ Pu-Be	Плутоний-238, бериллий	“	86.4	4.5	2.8 10 ⁶
²²⁶ Ra-Be	Радий, бериллий	“	1620	3.63	(1-1.7) 10 ⁷
²⁴¹ Am-Be	Америций, бериллий	“	458	4.3	(2.1-2.5) 10 ⁶
²²⁷ Ac-Be	Актиний, бериллий	“	21.7	4.5	(1.7-2.5) 10 ⁷
²¹⁰ Po-B	Полоний, бор	¹⁰ B(a,n)	0.39	2.7	2 10 ⁵
¹²⁴ Sb-Be	Сурьма, бериллий	⁹ Be(g,n)	0.17	0.024	2 10 ⁵
⁸⁸ Y-Be	Иттрий, бериллий	“	0.29	0.158	10 ⁵
MsTh-Be	Мезоторий, бериллий	“	6.7	0.827	3.5 10 ⁴
²²⁶ Ra-Be	Радий, бериллий	“	1620	0.1	3 10 ⁴
⁸⁸ Y-D	Иттрий, дейтерий	D(g,n)	0.29	0.31	0.3 10 ⁴
MsTh-D	Мезоторий, дейтерий	“	6.7	0.197	9.5 10 ⁴
²²⁶ Ra-D	Радий, дейтерий	“	1620	0.12	10 ³
²⁵² Cf	Калифорний	²⁵² Cf(n)	2.55	1.9	1.4 10 ¹¹



Физико-техническим источником нейтронов является нейтронная трубка. Она представляет собой малогабаритный электростатический ускоритель заряженных частиц - дейтонов (ядер атомов дейтерия ${}^2\text{H}\equiv\text{D}$), которые разгоняются до энергии более 100 кэВ, и направляются на тонкие мишени из дейтерия или трития (${}^3\text{H}\equiv\text{T}$), в которых индуцируются ядерные реакции:



Большую часть выделяющейся энергии уносит нейтрон. Распределение энергии нейтронов достаточно узкое и практически моноэнергетическое по углам вылета. Выход нейтронов порядка 10^8 на 1 микрокулон дейтонов. Работают нейтронные трубки, как правило, в импульсном режиме, при этом интенсивность выхода может достигать 10^{12} н/с. Портативные нейтронные генераторы практически не обладают радиационной опасностью в выключенном состоянии, имеют возможность регулирования режима излучения нейтронов. К недостаткам генераторов относятся ограниченный ресурс работы (100-300 часов) и нестабильность выхода нейтронов от импульса к импульсу (до 50 %).



1.2 Энергетические источники ионизирующих излучений

К энергетическим источникам излучений относятся различные ускорители заряженных частиц. Ускорителем в самом общем смысле слова является любая установка, сообщающая кинетическую энергию ионам или электронам. Исходя из этого ускорителем можно назвать электронно-лучевые трубки, рентгеновские трубки, трубки электронного микроскопа и т.д.

Наиболее простой способ ускорения частица с зарядом (e) заключается в том, что частицу заставляют пройти разность потенциалов U , в результате чего она приобретает кинетическую энергию $E = eU$.

Первым таким электростатическим ускорителем является *генератор Ван-де-Графа*. В этом генераторе электрический заряд наносился на поверхность непроводящей ленты с помощью ряда коронирующих острий, расположенных у основания установки. Затем заряд по движущейся ленте переносился внутрь шарового электрода, где и снимался на его поверхность рядом других острий. Третий ряд острий внутри электрода переносил на ленту заряд противоположного знака. Ускоритель имел два шаровых электрода. Между шарами, заряженными противоположными знаками была достигла разность потенциалов более 1 МВ, которая создавала ускоряющее поле для заряженных частиц.



Линейный ускоритель основан на использовании высокочастотного напряжения, прикладываемого к ряду промежутков, через которые проходят частицы. Частота и время прохождения частицей пути между двумя соседними промежутками связаны таким образом, что в момент прохождения каждого промежутка поле в нем всегда оказывает ускоряющее действие. Напряжение может подводиться с помощью бегущей волны, обладающей соответствующей скоростью. Частицы в процесс ускорения движутся прямолинейно, поэтому ускоритель называется линейным.

Циклотрон. Для получения с помощью линейного ускорителя очень больших энергий потребовались бы трубки колоссальной длины. Если бы удалось осуществить многократное прохождение частицы через одни и те же ускоряющие промежутки, это позволило бы резко сократить размеры установки. Для этого используется магнитное поле, заставляющее частицы двигаться по окружности. С этой целью на ускоряющие электроды подают переменное напряжение. Если частица при первом прохождении промежутка испытывает ускорение, то к моменту следующего прохождения электроды перезарядятся и поле по-прежнему будет ускорять частицу. В результате траектория частицы опишет спираль.

Синхротрон и др. ускорители этого типа работают на основании общей теории, справедливой для циклотронов, из которой заимствована идея многократного сообщения энергии частице, движущейся по приближенно круговой траектории под действием магнитного поля. При этом необходимо иметь в виду, что угловая скорость движения частицы в магнитном поле зависит от энергии.

Максимально достижимая энергия на ускорителях. Конечная энергия частицы зависит от протяженности и индукции магнитного поля

$$W = \frac{1}{2} \frac{q^2 r_{\max}^2 \cdot B^2}{m}. \quad (1.2)$$

Наибольшее значение импульса следует из формулы

$$r = m\mathcal{P} / qB, \text{ то есть } P_{\max} = m\mathcal{P}_{\max} = qBr_{\max}. \quad (1.3)$$

Соответствующая полная энергия с учетом энергии покоя

$$W_{\max} = mc^2 = \sqrt{(m_0 c^2)^2 + c^2 P_{\max}^2} = \sqrt{(m_0 c^2)^2 + c^2 q^2 B^2 r_{\max}^2} \approx cqBr_{\max}$$

или $W_{\max} \approx cqBr_{\max}$, так как энергия покоя очень мала по сравнению с полной энергией. Следовательно, максимально достижимая энергия пропорциональна индукции и линейных размеров в первой степени.



Вопросы для контроля изучаемого материала

1. Дайте определение гамма-излучения и перечислите основные процессы его возникновения.
2. Как меняется проникающая способность гамма-квантов в зависимости от энергии и плотности среды?
3. Назовите наиболее распространенные радионуклидные источники гамма-излучения и их области применения.
4. Какие физико-технические установки используются для генерации гамма-квантов?
5. Чем рентгеновское излучение отличается от гамма-излучения по природе происхождения?
6. Опишите устройство рентгеновской трубки и механизм генерации рентгеновских квантов.
7. Как классифицируются нейтроны по энергии и какие процессы взаимодействия с веществом они претерпевают?
8. Какие существуют радионуклидные источники нейтронов и на каких реакциях они основаны?
9. Объясните принцип работы циклотронного и линейного ускорителя.
10. Какие формулы определяют максимально достижимую энергию частиц в ускорителях?



Рекомендуемая литература:

1. В. И. Дерюгин, Радиационная физика твердого тела, М.: Энергоатомиздат, 2005.
2. Ф. Ф. Фейнман, Фейнмановские лекции по физике, Т. 1–3, М.: Мир, 1977.
3. Г. Н. Флеров, Физика атомного ядра и радиационные процессы, М.: Наука, 1982.
4. М. Н. Михайлов, Основы радиационной физики и дозиметрии, СПб.: БХВ-Петербург, 2013.
5. С. В. Кузнецов, Физика ионизирующих излучений, М.: Академия, 2018.