

Профессор
И.Н.Бекман

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Лекция 13. ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Ионизирующее излучение сопровождало Большой взрыв, с которого началось существование нашей Вселенной 20 миллиардов лет назад. С того времени радиация постоянно наполняет космическое пространство. Радиоактивные материалы вошли в состав Земли с самого ее рождения, задолго до появления на Земле жизни и задолго до открытия явления радиоактивности. Радионуклиды и сопутствующие им излучения постоянно присутствуют в окружающей человека среде. Сам человек тоже радиоактивен, так как во всякой живой ткани присутствуют в следовых количествах радиоактивные вещества.

К сожалению (или к счастью?) природа не наделила человека органами чувств, реагирующих на радиацию. Поэтому её наличие может быть обнаружено только косвенным путем с привлечением сложной аппаратуры, профессиональных знаний и детальных исследований.

В данной лекции мы рассмотрим основные типы ионизирующих излучений, как природных, так и техногенных. Коротко остановимся на общих характеристиках излучения и источниках ионизирующих излучений.

1. ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ПОЛЕ

Радиация - обобщенное понятие. Оно включает различные виды излучений, часть которых встречается природе, другие получаются искусственным путем.

Начнем с некоторых определений.

Излучение электромагнитное - процесс образования свободного электромагнитного поля; излучением называют также само свободное электромагнитное поле. Излучают ускоренно движущиеся заряженные частицы (например, тормозное излучение, синхротронное излучение, излучение переменных диполя, квадруполь и мультиполей высшего порядков). Атом и другие атомные системы излучают при квантовых переходах из возбужденных состояний в состояния с меньшей энергией.

Ионизирующее излучение - излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию ионов разных знаков. (Видимый свет и ультрафиолетовое излучение не относят к ионизирующим излучениям).

Непосредственно ионизирующее излучение - ионизирующее излучение, состоящее из заряженных частиц, имеющих кинетическую энергию, достаточную для ионизации при столкновении. (Непосредственно ионизирующее излучение может состоять из электронов, протонов, α - частиц и др.).

Косвенно ионизирующее излучение - ионизирующее излучение, состоящее из незаряженных частиц, которые могут создавать непосредственно ионизирующее излучение и (или) вызывать ядерные превращения. (Косвенно ионизирующее излучение может состоять из нейтронов, фотонов и др.).

Фотонное излучение - электромагнитное косвенно ионизирующее излучение.

γ -Излучение - фотонное излучение, возникающее при ядерных превращениях или аннигиляции частиц.

Характеристическое излучение - фотонное излучение с дискретным энергетическим спектром, возникающее при изменении энергетического состояния электронов атома.

Тормозное излучение - фотонное излучение с непрерывным энергетическим спектром, испускаемое при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц.

Рентгеновское излучение - фотонное излучение, состоящее из тормозного и (или) характеристического излучения, генерируемое рентгеновскими аппаратами.

Корпускулярное излучение - ионизирующее излучение, состоящее из частиц с массой, отличной от нуля (α - β - частиц, нейтронов и др.).

α -Излучение - корпускулярное излучение, состоящее из α - частиц (ядер ${}^4\text{He}$), испускаемых при радиоактивном распаде ядер или при ядерных реакциях, превращениях.

β -Излучение - корпускулярное излучение с непрерывным энергетическим спектром, состоящее из отрицательно или положительно заряженных электронов или позитронов (β^- или β^+ - частиц) и возникающее при радиоактивном β - распаде ядер или нестабильных частиц. Характеризуется граничной энергией спектра E_{β} .

Аннигиляционное излучение - фотонное излучение, возникающее в результате аннигиляции частицы и античастицы (например, при взаимодействии β^- электрона и β^+ позитрона).

Моноэнергетическое ионизирующее излучение - ионизирующее излучение, состоящее из фотонов одинаковой энергии или частиц одного вида с одинаковой кинетической энергией.

Смешанное ионизирующее излучение - ионизирующее излучение, состоящее из частиц различного вида или из частиц и фотонов.

Направленное ионизирующее излучение ионизирующее излучение с выделенным направлением распространения.

Естественный фон излучения - ионизирующее излучение, создаваемое космическим излучением и излучением естественно распределенных природных радиоактивных веществ (на поверхности Земли, в приземной атмосфере, в продуктах питания, воде, в организме человека и др.).

Фон - ионизирующее излучение, состоящее из естественного фона и ионизирующих излучений посторонних источников.

Космическое излучение - ионизирующее излучение, которое состоит из первичного излучения, поступающего из космического пространства, и вторичного излучения, возникающего в результате взаимодействия первичного излучения с атмосферой.

Узкий пучок излучения - такая геометрия излучения, при которой детектор регистрирует только нерассеянное излучение источника.

Широкий пучок излучения - такая геометрия излучения, при которой детектор регистрирует нерассеянное и рассеянное излучения источника.

Поле ионизирующего излучения - пространственно-временное распределение ионизирующего излучения в рассматриваемой среде.

Поток ионизирующих частиц (фотонов) - отношение числа ионизирующих частиц (фотонов) dN , проходящих через данную поверхность за интервал времени dt , к этому интервалу: $F = dN/dt$.

Поток энергии частиц - отношение энергии падающих частиц к интервалу времени $\Psi = dE/dt$.

Плотность потока ионизирующих частиц (фотонов) - отношение потока ионизирующих частиц (фотонов) dF проникающих в объем элементарной сферы, к площади центрального поперечного сечения dS этой сферы: $\varphi = dF/dS = d^2N/dtdS$. (Плотность потока энергии частиц определяется аналогично).

Флюенс (перенос) ионизирующих частиц (фотонов) - отношение числа ионизирующих частиц (фотонов) dN , проникающих в объем элементарной сферы, к площади центрального поперечного сечения dS этой сферы: $\Phi = dN/dS$.

Энергетический спектр ионизирующих частиц - распределение ионизирующих частиц по их энергии.

Эффективная энергия фотонного излучения - энергия фотонов такого моноэнергетического фотонного излучения, относительное ослабление которого в поглотителе определенного состава и определенной толщины то же самое, что и рассматриваемого немонаэнергетического фотонного излучения.

Граничная энергия спектра β -излучения - наибольшая энергия β -частиц в непрерывном энергетическом спектре β -излучения данного радионуклида.

Альbedo излучения - отношение числа частиц (фотонов), отражающихся от границы раздела двух сред, к числу частиц (фотонов), падающих на поверхность раздела.

Запаздывающее излучение: частицы, излучаемые продуктами распада, в отличие от частиц (нейтронов и гамма - лучей), возникающих непосредственно в момент деления.

Ионизация в газах: отрыв от атома или молекулы газа одного или нескольких электронов. В результате ионизации в газе возникают свободные носители заряда (электроны и ионы) и он приобретает способность проводить электрический ток.

Термин «**излучение**» охватывает диапазон электромагнитных волн, включая видимый спектр, инфракрасную и ультрафиолетовую области, а также радиоволны, электрический ток и ионизирующее излучение. Вся несхожесть этих явлений обусловлена лишь частотой (длиной волны) излучения. Ионизирующее излучение может представлять опасность для здоровья человека. **Ионизирующее излучение (радиация)** - вид излучения, который изменяет физическое состояние атомов или атомных ядер, превращая их в электрически заряженные ионы или продукты ядерных реакций. При определенных обстоятельствах присутствие таких ионов или продуктов ядерных реакций в тканях организма может изменять течение процессов в клетках и молекулах, а при накоплении этих событий может нарушить ход биологических реакций в организме, т.е. представлять опасность для здоровья человек.

2. ВИДЫ ИЗЛУЧЕНИЙ

Различают корпускулярное излучение, состоящее из частиц с массой отличной от нуля, и электромагнитное (фотонное) излучение.

2.1. Корпускулярное излучение

К корпускулярному ионизирующему излучению относят альфа-излучение, электронное, протонное, нейтронное и мезонное излучения. Корпускулярное излучение, состоящее из потока заряженных частиц (α -, β -частиц, протонов, электронов), кинетическая энергия которых достаточна для ионизации атомов при

столкновении, относится к классу непосредственно ионизирующего излучения. Нейтроны и другие элементарные частицы непосредственно не производят ионизацию, но в процессе взаимодействия со средой высвобождают заряженные частицы (электроны, протоны), способные ионизировать атомы и молекулы среды, через которую проходят. Соответственно, корпускулярное излучение, состоящее из потока незаряженных частиц, называют косвенно ионизирующим излучением.

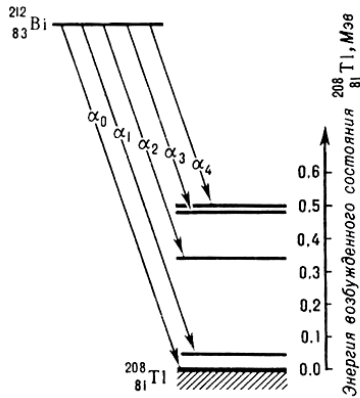


Рис.1. Схема распада ^{212}Bi .

2.1.1 Альфа-излучение

Альфа частицы (α - частицы) - ядра атома гелия, испускаемые при α - распаде некоторыми радиоактивными атомами. α - частица состоит из двух протонов и двух нейтронов.

Альфа излучение - поток ядер атомов гелия (положительно заряженных и относительно тяжелых частиц).

Естественное альфа-излучение как результат радиоактивного распада ядра, характерно для неустойчивых ядер тяжелых элементов, начиная с атомного номера более 83, т.е. для естественных радионуклидов рядов урана, и тория, а также, для полученных искусственным путем трансурановых элементов.

Типичная схема α -распада природного радионуклида представлена на Рис.1, а энергетический спектр α -частиц, образующихся при распаде радионуклида – на Рис.2.

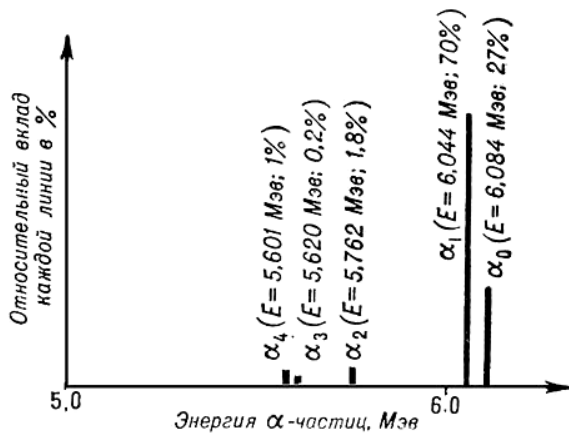


Рис.2 Энергетический спектр α -частиц

Возможность α - распада связана с тем, что масса (a , значит, и суммарная энергия ионов) α - радиоактивного ядра больше суммы масс α - частицы и образующегося после α -распада дочернего ядра. Избыток энергии исходного (материнского) ядра освобождается в форме кинетической энергии α - частицы и отдачи дочернего ядра. α - частицы представляют собой положительно заряженные ядра гелия - $^2\text{He}^4$ и вылетают из ядра со скоростью 15-20 тыс. км/сек. На своём пути они производят сильную ионизацию среды,

вырывая электроны из орбит атомов.

Пробег α - частиц в воздухе порядка 5-8 см, в воде - 30-50 микрон, в металлах - 10-20 микрон. При ионизации α - лучами наблюдаются химические изменения вещества, и нарушается кристаллическая структура твердых тел. Так как между α - частицей и ядром существует электростатическое отталкивание, вероятность ядерных реакций под действием α - частиц природных радионуклидов (максимальная энергия 8,78 МэВ у ^{214}Po) очень мала, и наблюдается лишь на легких ядрах (Li, Be, B, C, N, Na, Al) с образованием радиоактивных изотопов и свободных нейтронов.

2.1.2 Протонное излучение

Протонное излучение – излучение, образующееся в процессе самопроизвольного распада нейтронно-дефицитных атомных ядер или как выходной пучок ионного ускорителя (например, синхрофазотрона).

2.1.3 Нейтронное излучение

Нейтронное излучение - поток нейтронов, которые преобразуют свою энергию в упругих и неупругих взаимодействиях с ядрами атомов. При неупругих взаимодействиях возникает вторичное излучение, которое может состоять как из заряженных частиц, так и из гамма-квантов (гамма-излучения). При упругих взаимодействиях возможна обычная ионизация вещества.

Источниками нейтронного излучения являются: спонтанно делящиеся радионуклиды; специально изготовленные радионуклидные источники нейтронов; ускорители электронов, протонов, ионов; ядерные реакторы; космическое излучение.

С точки зрения биологического Нейтроны образуются в ядерных реакциях (в ядерных реакторах и в других промышленных и лабораторных установках, а также при ядерных взрывах).

Нейтроны не обладают электрическим зарядом. Условно нейтроны в зависимости от кинетической энергии разделяются на быстрые (до 10 МэВ), сверхбыстрые, промежуточные, медленные и тепловые. Нейтронное излучение обладает большой проникающей способностью. Медленные и тепловые нейтроны вступают в ядерные реакции, в результате могут образовываться стабильные или радиоактивные изотопы.

Свободный нейтрон - это нестабильная, электрически нейтральная частица со следующими свойствами:

Спин	$1/2$
Заряд (e - заряд электрона)	$q_n = (-0,4 \pm 1,1) \cdot 10^{-21} e$
Масса в атомных единицах	$m_n = 939,56533 \pm 0,00004 \text{ МэВ},$ $= 1,00866491578 \pm 0,00000000055 \text{ а.е.м.}$
Разность масс нейтрона и протона в атомных единицах	$m_n - m_p = 1,2933318 \pm 0,0000005 \text{ МэВ},$ $= 0,0013884489 \pm 0,0000000006 \text{ а.е.м.}$
Время жизни	$t_n = 885,4 \pm 0,9_{\text{stat}} \pm 0,4_{\text{syst}} \text{ с}$
Магнитный момент	$m_n = -1,9130427 \pm 0,0000005 m_N$
Электрический дипольный момент	$d_n < 0,63 \cdot 10^{-25} e \cdot \text{см} \text{ (CL=90\%)}$
Электрическая поляризуемость	$a_n = (\text{рис. 1}) \cdot 10^{-3} \Phi_M^3$

Эти свойства нейтрона позволяют использовать его, с одной стороны, как объект, который изучается и, с другой стороны, как инструмент, при помощи которого ведутся исследования. В первом случае исследуются уникальные свойства нейтрона, что является актуальным и дает возможность наиболее надежно и точно определить фундаментальные параметры электрослабого взаимодействия и, тем самым либо подтвердить, либо опровергнуть Стандартную модель. Наличие магнитного момента у нейтрона уже свидетельствует о его сложной структуре, т.е. его "неэлементарности". Во втором случае взаимодействие неполяризованных и поляризованных нейтронов разных энергий с ядрами позволяет их использовать в физике ядра и элементарных частиц. Изучение эффектов нарушения пространственной четности и инвариантности относительно обращения времени в различных процессах - от нейтронной оптики до деления ядер нейтронами - это далеко не полный перечень наиболее актуальных сейчас направлений исследований.

Тот факт, что реакторные нейтроны тепловых энергий имеют длины волн, сравнимые с межатомными расстояниями в веществе, делает их незаменимым инструментом для исследования конденсированных сред. Взаимодействие нейтронов с атомами является сравнительно слабым, что позволяет нейтронам достаточно глубоко проникать в вещество - в этом их существенное преимущество по сравнению с рентгеновскими и γ -лучами, а также пучками заряженных частиц. Из-за наличия массы нейтроны при том же импульсе (следовательно, при той же длине волны) обладают значительно меньшей энергией, чем рентгеновские и γ -лучи, и эта энергия оказывается сравнимой с энергией тепловых колебаний атомов и молекул в веществе, что дает возможность изучать не только усредненную статическую атомную структуру вещества, но и динамические процессы, в нем происходящие. Наличие магнитного момента у нейтронов позволяет использовать их для изучения магнитной структуры и магнитных возбуждений вещества, что очень важно для понимания свойств и природы магнетизма материалов.

Рассеяние нейтронов атомами обусловлено, в основном, ядерными силами, следовательно сечения их когерентного рассеяния никак не связаны с атомным номером (в отличие от рентгеновских и γ -лучей). Поэтому облучение материалов нейтронами позволяет различать положения атомов легких (водород, кислород и др.) элементов, идентификация которых почти невозможна с использованием рентгеновских и γ -лучей. По этой причине нейтроны успешно применяются при изучении биологических объектов, в материаловедении, в медицине и др. областях. Кроме того, различие в сечениях рассеяния нейтронов у разных изотопов позволяет не только отличать в материале элементы с близкими атомными номерами, но и исследовать их изотопный состав. Наличие изотопов с отрицательной амплитудой когерентного рассеяния дает уникальную возможность контрастирования исследуемых сред, что также очень часто используют в биологии и медицине.

Когерентное рассеяние - рассеяние излучения с сохранением частоты и с фазой, отличающейся на π от фазы первичного излучения. Рассеянная волна может интерферировать с падающей волной или другими когерентно рассеянными волнами.

Некогерентное рассеяние возникает в результате эффекта Комптона, при котором энергия части рассеиваемых фотонов оказывается меньше энергии квантов первичного пучка. Соответственно, длина рассеиваемой волны в этом случае отличается от длины волны падающего излучения, а их фазы никак не связаны. Рассеянное излучение не интерферирует с когерентно рассеянным и первичным излучениями.

Проникающая способность нейтронов большая. Поскольку нейтроны не имеют электрического заряда, они свободно взаимодействуют с ядрами атомов, вызывая ядерные реакции. Проникающая способность нейтронов зависит от их энергии и состава атомов вещества, с которыми они взаимодействуют. Слой половинного ослабления легких материалов для нейтронного излучения в несколько раз меньше, чем для тяжелых. И наоборот, тяжелые материалы, например металлы, хуже ослабляют нейтронное излучение, чем гамма-излучение. Лучшими для защиты от нейтронного излучения являются водородосодержащие материалы, то есть имеющие в своей химической формуле атомы водорода. Обычно применяют воду, парафин, полиэтилен. Кроме того, нейтронное излучение хорошо поглощается бором, бериллием, кадмием, графитом, а также водой и парафином. Поскольку нейтронные излучения сопровождаются γ -излучениями, необходимо применять многослойные экраны из различных материалов: свинец-полиэтилен, сталь - вода и т.д. В ряде случаев для одновременного поглощения нейтронного и гамма-излучений применяют водные растворы гидроксидов тяжелых металлов, например, гидроксид железа $Fe(OH)_3$. Облучаемые нейтронами вещества могут приобретать радиоактивные свойства, то есть получать так называемую наведенную радиоактивность.

2.1.4 Электронное излучение

Электронное излучение - пучок электронов на выходе электронного ускорителя или электронной пушки. Характеризуется средней энергией излучения и дисперсией (разбросом), а также шириной пучка. Специальными мерами можно получить моноэнергетический узкий пучок высокоэнергетических электронов.

2.1.5 Бета-излучение

Бета частицы (β - частицы): электроны и позитроны, испускаемые ядрами атомов при β - распаде

Бета-излучение - это электроны или позитроны, которые образуются при β -распаде различных элементов от самых легких (нейтрон) до самых тяжелых.

Бета-излучение - самый распространенный тип радиоактивного распада ядер, особенно для искусственных радионуклидов. β - частицы (как электроны, так и позитроны), взаимодействуют с электронами атомных оболочек и, передавая им часть своей энергии, могут вырывать их с орбит; при этом образуется положительный ион и свободный электрон. При β -распаде электроны движутся со скоростью близкой к скорости света. Так как скорость β - частиц значительно выше скорости α - частиц, они реже взаимодействуют с атомами среды и плотность ионизации на единицу пробега у них в сотни раз ниже, чем у α - частиц, а пробег в воздухе достигает 10 м (у естественных β - излучателей). В мягкой ткани пробег может достигать 10 - 12 мм. Поглощаются они слоем алюминия толщиной 1 мм.

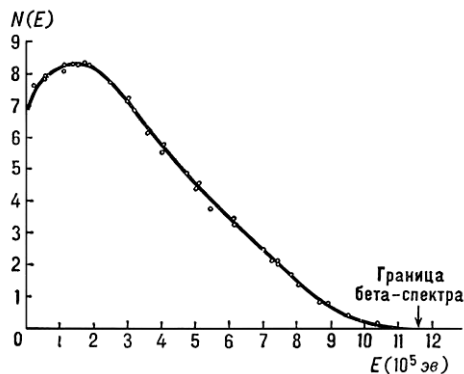


Рис. 3. Типичный спектр β -частиц.

В отличие от электронного излучения, β - излучение сопровождается потоком нейтрино (точнее - антинейтрино для электронов и нейтрино для позитронов). Позитронное излучение сопровождается аннигиляционным γ -излучением (с энергией 0,51 и/или 1,02 МэВ).

2.2 Космическое излучение.

Космические лучи - поток стабильных частиц высоких энергий (от 1 до 10^{12} ГэВ), приходящих на Землю из мирового пространства (первичное излучение), а также рожденное этими частицами при взаимодействиях с атомными ядрами атмосферы вторичное излучение, в состав которого входят все известные элементарные частицы. Первичные космические лучи состоят главным образом из протонов (90%), α -частиц (7%), других атомных ядер, вплоть до самых тяжелых, и небольшого количества электронов, позитронов и фотонов большей энергии. Первичное космическое излучение изотропно в пространстве и неизменно во времени. Подавляющая часть первичных космических лучей приходит на Землю из Галактики и лишь небольшая их часть связана с активностью Солнца.

Космическое излучение - электромагнитное или корпускулярное излучение, имеющее внеземной источник; подразделяют на первичное (которое, в свою очередь, делится на галактическое и солнечное) и вторичное. В узком смысле иногда отождествляют космическое излучение и космические лучи.

Космическое излучение - более широкое понятие, чем космические лучи, и включает в себя последнее, а также реликтовое излучение, космическое радиоизлучение и др.

Ослабление ионизирующей способности космического излучения с приближением к поверхности Земли показано на **Рис. 4**. Поток космических лучей у поверхности земли равен примерно 1 частица/см² в одну секунду.

На одном из компонентов космических лучей – нейтрино – построена нейтринная астрономия, связанная с исследованием потоков нейтрино от внеземных источников (Солнца, звезд). Рентгеновское излучение космическое - электромагнитное излучение космических тел в диапазоне энергий фотонов от 100 эВ до 10⁵ эВ, регистрируемое рентгеновскими телескопами. Существуют дискретные источники и диффузный фон космического рентгеновского излучения. К галактическим источникам относятся преимущественно нейтронные звезды и, возможно, черные дыры, шаровые звездные скопления, к внегалактическим источникам - квазары, отдельные галактики и их скопления.

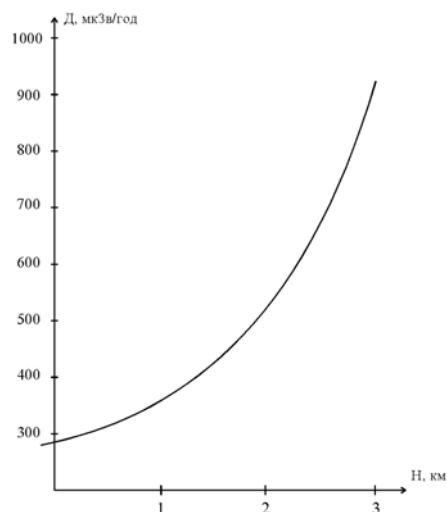


Рис. 4. Изменение годовой дозы космического облучения в зависимости от абсолютной высоты

Вариации ионизирующей составляющей космического излучения вызываются и магнитным полем Земли, отклоняющим первичные нарушенные космические ядра. Мощность эффективной дозы, вызванной ионизирующей компонентой космического излучения на открытом воздухе на уровне моря, составляет на экваторе величину порядка 260-270 мкЗв/год, в северных широтах - 270-290 мкЗв/год. По абсолютному значению эффективные дозы, обусловленные нейтронной составляющей космического излучения, в несколько раз ниже ионизирующей составляющей, но более значительно зависят от широты местности и равны в экваториальных широтах 31 мкЗв/год, в полярных - 95 мкЗв/год.

С высотой, в пределах колебаний рельефа Земли, на каждые сто метров над уровнем моря, годовая эффективная доза увеличивается на 10 мкЗв за счет уменьшения слоя атмосферы. Начиная с высоты 1,5-2,0 км, этот прирост увеличивается (**Рис. 4**).

2.3 Электромагнитное излучение

Излучение электромагнитное - процесс образования свободного электромагнитного поля.

Классическая физика рассматривает излучение как испускание электромагнитных волн ускоренно движущимися электрическими зарядами (в частности, переменными токами). Классическая теория объяснила очень многие характерные черты процессов излучения, однако она не смогла дать удовлетворительного описания ряда явлений, особенно теплового излучения тел и излучения микросистем (атомов и молекул). Такое описание оказалось возможным лишь в рамках квантовой теории излучения, показавшей, что излучение представляет собой рождение фотонов при изменении состояния квантовых систем (например, атомов). Квантовая теория, более глубоко проникнув в природу излучения, одновременно указала и границы применимости классической теории: последняя часто является очень хорошим приближением при описании излучения, оставаясь, например, теоретической базой радиотехники.

Простейшим источником поля является точечный заряд. У покоящегося заряда излучение отсутствует. Равномерно движущийся заряд (в пустоте) также не может быть источником излучения. Заряд же, движущийся ускоренно, излучает. В зависимости от физической природы ускорения излучение иногда приобретает особые наименования. Так, излучение, возникающее при торможении заряженных частиц в веществе в результате воздействия на них кулоновских полей ядер и электронов атомов, называется тормозным излучением. Излучение заряженной частицы, движущейся в магнитном поле, искривляющем её траекторию, называется синхротронным излучением (или магнитотормозным излучением). Оно наблюдается, например, в циклических ускорителях заряженных частиц.

Одним из важнейших примеров излучения релятивистских частиц является синхротронное излучение заряженных частиц в циклических (кольцевых) ускорителях. Резкое отличие от нерелятивистского излучения проявляется здесь уже в спектральном составе излучения: если частота обращения заряженной частицы в ускорителе равна ω (нерелятивистский излучатель испускал бы волны такой же частоты), то интенсивность её излучения имеет максимум при частоте

$$\omega_{\text{макс}} \sim \gamma^3 \omega, \quad (1)$$

$$\text{где } \gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2},$$

т. е. основная доля излучения при $v \rightarrow c$ приходится на частоты, более высокие, чем ω . Такое излучение направлено почти по касательной к орбите частицы, в основном вперёд по направлению её движения. Ультрарелятивистская частица может излучать электромагнитные волны, даже если она движется прямолинейно и равномерно (но только в веществе, а не в пустоте!). Это излучение названное излучением Черенкова-Вавилова, возникает, если скорость заряженной частицы в среде превосходит фазовую скорость света в этой среде ($u_{\text{фаз}} = c/n$, где n - показатель преломления среды). Излучение появляется из-за того, что частица «перегоняет» порождаемое ею поле, отрывается от него.

Атом также может быть источником излучения. Система из ядра и движущегося в его кулоновском поле электрона должна находиться в одном из дискретных состояний (на определённом уровне энергии). При этом все состояния, кроме основного (т. е. имеющего наименьшую энергию), неустойчивы. Атом, находящийся в неустойчивом (возбуждённом) состоянии, даже если он изолирован, переходит в состояние с меньшей энергией. Этот квантовый переход сопровождается испусканием фотона; такое излучение называется спонтанным (самопроизвольным). Энергия, уносимая фотоном $\varepsilon_\gamma = \hbar\omega$, равна разности энергии начального i и конечного j состояний атома ($\varepsilon_i > \varepsilon_j$, $\varepsilon_\gamma = \varepsilon_i - \varepsilon_j$); отсюда вытекает формула Н.Бора для частот излучения:

$$\omega_{ij} = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_j}{\hbar} \quad (2)$$

Такие характеристики спонтанного излучения, как направление распространения (для совокупности атомов - угловое распределение их спонтанного излучения) и поляризация, не зависят от излучения других объектов (внешнего электромагнитного поля). Формула Бора (2) определяет дискретный набор длин волн излучения атома. Она объясняет, почему спектры излучений атомов имеют «линейчатый» характер - каждая линия спектра соответствует одному из квантовых переходов атомов данного вещества. Квантовая теория излучения позволяет объяснить как различие в интенсивностях разных линий, так и распределение интенсивности в пределах каждой линии; в частности, ширину спектральных линий.

Источниками электромагнитного излучения могут быть не только атомы, но и более сложные квантовые системы. Общие методы описания излучения таких систем те же, что и при рассмотрении атомов, но конкретные особенности излучения весьма разнообразны. Излучения молекул, например, имеет более сложные спектры, чем излучения атомов. Для излучения атомных ядер типично, что энергия отдельных квантов обычно велика (γ -кванты), интенсивность же излучения сравнительно низка.

Электромагнитное излучение часто возникает и при взаимных превращениях элементарных частиц (аннигиляции электронов и позитронов, распаде мезона и т.д.).

Если частота внешнего излучения, падающего на уже возбуждённый атом, совпадает с одной из частот возможных для этого атома согласно (2) квантовых переходов, то атом испускает квант излучения, в точности такой же, как и налетевший на него (резонансный) фотон. Это излучение называется вынужденным. По своим свойствам оно резко отличается от спонтанного - не только частота, но и направление распространения, и поляризация испущенного фотона оказываются теми же, что у резонансного. Вероятность вынужденного излучения (в отличие от спонтанного!) пропорциональна интенсивности внешнего излучения, т. е. количеству резонансных фотонов. В обычных условиях интенсивность вынужденного излучения мала по сравнению с интенсивностью спонтанного. Однако она сильно возрастает в веществе, в котором в метастабильном состоянии находится больше атомов, чем в одном из состояний с меньшей энергией (в которое возможен квантовый переход). При попадании в такое вещество резонансного фотона испускаются фотоны, в свою очередь играющие роль резонансных. Число излучаемых фотонов лавинообразно возрастает; результирующее излучение состоит из фотонов, совершенно идентичных по своим свойствам, и образует когерентный поток. На этом явлении основано действие квантовых генераторов.

Электромагнитное излучение имеет широкий спектр энергий и различные источники: гамма-излучение атомных ядер и тормозное излучение ускоренных электронов, радиоволны и др. (Табл.1).

Табл. 1. Характеристики электромагнитных излучений.

Энергия, эВ	Длина волны, м	Частота, Гц	Источник излучения
10^9	10^{-16}	10^{24}	Тормозное излучение
10^5	10^{-12}	10^{20}	Гамма излучение ядер
10^3	10^{-10}	10^{18}	Рентгеновское излучение
10^1	10^{-8}	10^{16}	Ультрафиолетовое излучение

10^{-1}	10^{-6}	10^{14}	Видимый свет
10^{-3}	10^{-4}	10^{12}	Инфракрасное излучение
10^{-5}	10^{-2}	10^{10}	Микроволновое излучение
10^{-7}	100	10^8	СВЧ
10^{-9}	102	10^6	Радиоволны ВЧ
10^{-11}	104	10^4	Радиоволны НЧ

Фотон - элементарная частица энергии, обладающая как свойствами частицы, так и волны: фотон не имеет заряда и массы, но обладает импульсом. Энергия света, рентгеновских лучей, гамма - лучей и т.д. переносится фотонами.

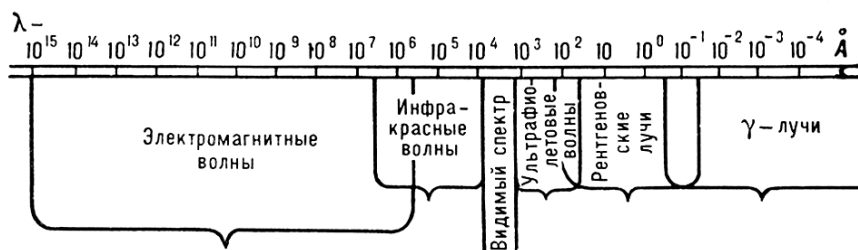


Рис. 5. Длины волн, характерные для различных видов электромагнитного излучения.

Фотонное излучение - фотонное излучение, возникающее при изменении энергетического состояния атомных ядер или при аннигиляции частиц.

К фотонному ионизирующему излучению относятся γ -излучение, возникающее при изменении энергетического состояния атомных ядер или аннигиляции частиц, тормозное излучение, возникающее при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц, характеристическое излучение с дискретным энергетическим спектром, возникающее при изменении энергетического состояния электронов атома и рентгеновское излучение, состоящее из тормозного и/или характеристического излучений.

2.3.1 Рентгеновское излучение

Рентгеновские лучи - электромагнитное ионизирующее излучение, занимающее спектральную область между гамма и ультрафиолетовым излучением в пределах длин волн $10^{-3} - 100$ нм (от 10^{-12} до 10^{-5} см).

Энергетический диапазон от 100 эВ до 0,1 МэВ. Рентгеновские лучи с длиной волны $l < 0,2$ нм условно называются жёсткими, с $l > 0,2$ нм - мягкими рентгеновскими лучами.

Рентгеновские лучи используются в медицине для исследований, диагностики и лечения определенных органических нарушений органов тела, в особенности - внутренних органов. Открыты в 1895 году В.К.Рентгеном и названы им X-лучами (этот термин применяется практически во всех странах, кроме Германии и России).

В зависимости от механизма возникновения рентгеновских лучей их спектры могут быть непрерывными (тормозными) или линейчатыми (характеристическими).

Линейчатое излучение возникает после ионизации атома с выбрасыванием электрона одной из его внутренних оболочек. Такая ионизация может быть результатом столкновения атома с быстрой частицей, например электроном (первичные рентгеновские лучи), или поглощения атомом фотона (флуоресцентные рентгеновские). Ионизованный атом оказывается в начальном квантовом состоянии на одном из высоких уровней энергии и через 10^{-16} - 10^{-15} сек переходит в конечное состояние с меньшей энергией. При этом избыток энергии атом может испустить в виде фотона определённой частоты. Частоты линий спектра такого излучения характерны для атомов каждого элемента, поэтому линейчатый рентгеновский спектр называется характеристическим. Зависимость частоты ν линий этого спектра от атомного номера Z определяется законом Мозли: $\sqrt{\nu} = AZ + B$, где A и B — величины, постоянные для каждой линии спектра.

Характеристическое рентгеновское излучение — электромагнитное излучение, испускаемое при переходах электронов с внешних электронных оболочек атома на внутренние (характеристический спектр).

Характеристический спектр – линейчатый рентгеновский спектр, возникающий при переходах электронов верхних оболочек атома на более близко расположенные к ядру K -, L -, M -, N – оболочки. Частоты линий характеристического спектра химических элементов подчиняется закону Мозли (Рис. 6).

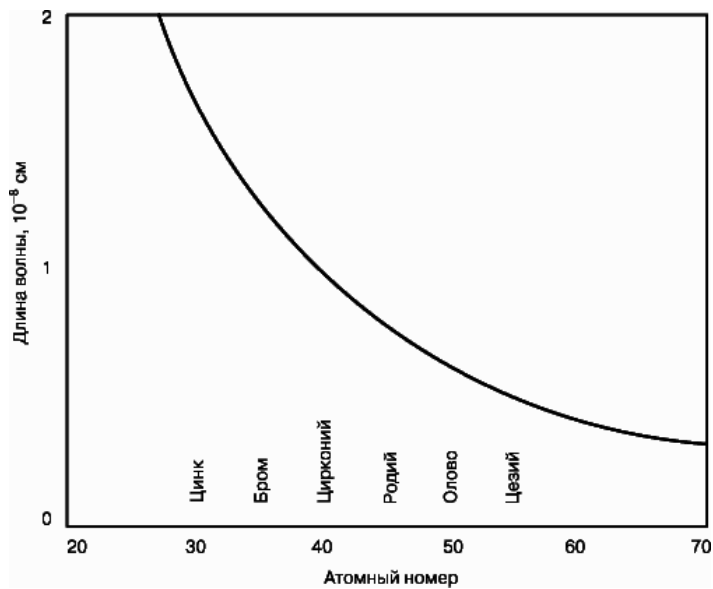


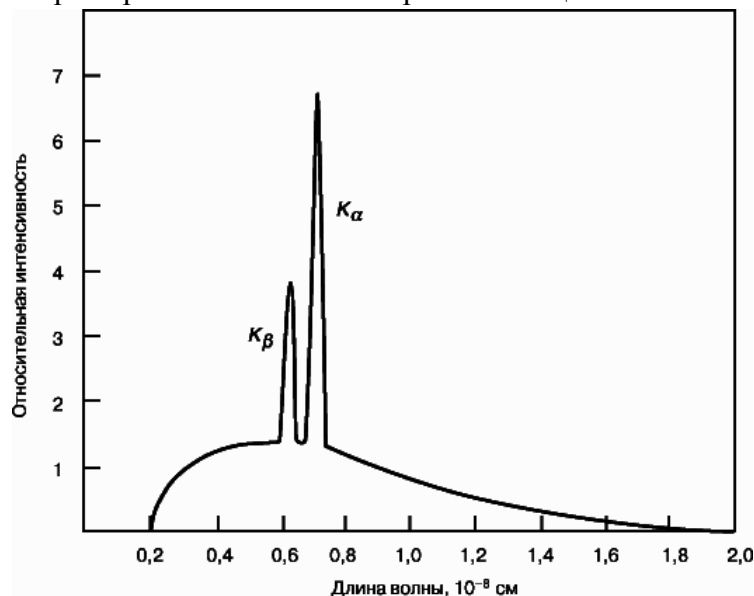
Рис. 6. Длина волны характеристического рентгеновского излучения, испускаемого химическими элементами, зависит от атомного номера элемента. Кривая соответствует закону Мозли: чем больше атомный номер элемента, тем меньше длина волны характеристической линии.

Закон Мозли – линейная зависимость квадратного корня из частоты характеристического рентгеновского излучения от атомного номера химического элемента. Установлен экспериментально Г.Мозли в 1913. Закон Мозли – основа рентгеновского спектрального анализа.

Непрерывный рентгеновский спектр испускают быстрые заряженные частицы в результате их торможения при взаимодействии с атомами мишени; этот спектр достигает значительной интенсивности лишь при бомбардировке мишени электронами.

Интенсивность тормозных рентгеновских лучей распределена по всем частотам до высокочастотной границы ν_0 , на которой энергия фотонов $h\nu_0$ (h — Планка постоянная) равна энергии eV бомбардирующих электронов (e — заряд электрона, V — разность потенциалов ускоряющего поля, пройденная ими). Этой частоте соответствует коротковолновая граница спектра $\lambda_0 = hc/eV$ (c — скорость света).

Тормозное рентгеновское излучение (рентгеновские лучи) с непрерывным энергетическим спектром - коротковолновое электромагнитное (фотонное) излучение. Диапазон частот, $3 \cdot 10^{16} \div 3 \cdot 10^{19}$ Гц, диапазон длин волн $10^{-8} \div 10^{-12}$, м. Образуется при уменьшении кинетической энергии (торможении, рассеянии) быстрых заряженных частиц, например, при торможении в кулоновском поле ускоренных электронов. Существенно для легких частиц электронов и позитронов. Спектр тормозного излучения непрерывен, максимальная энергия равна начальной энергии частицы.



Обычный рентгеновский спектр состоит из непрерывного спектра (континуума) и характеристических линий (острые пики). Линии $K\alpha$ и $K\beta$ возникают вследствие взаимодействий ускоренных электронов с электронами внутренней K -оболочки (Рис. 7).

Рис. 7. Типичный рентгеновский спектр.

Примеры: тормозное рентгеновское излучение в рентгеновской трубке, тормозное гамма-излучение быстрых электронов ускорителя при их попадании на мишень и т. д. Традиционный метод генерации рентгеновских лучей - бомбардировка металлического электрода в вакуумной трубке пучком ускоренных электродов. Рентгеновское излучение обладает большой проникающей

способностью, действует на фотографическую эмульсию, вызывает люминесценцию, активно действует на клетки живого организма, ионизирует газы, взаимодействует с ионами кристаллической решётки, обладает корпускулярными свойствами, невидимо.

Тормозное рентгеновское излучение, испускаемое очень тонкими мишенями, полностью поляризовано вблизи ν_0 ; с уменьшением ν степень поляризации падает. Характеристическое излучение, как правило, не поляризовано.

Рентгеновские лучи - электромагнитные волны, поэтому они рассеиваются заряженными частицами. Известно, что фотоны электромагнитного излучения обладают свойствами, как волны, так и частицы.

Свойство фотонов, как частиц, предполагает при упругом столкновении их с заряженными частицами испускание фотонов с той же частотой, а при неупругом - наличие эффекта Комптона, с которым как будет показано ниже, связано уменьшение частоты рассеянной волны. Волновые же свойства предполагают преломление, отражение, рассеяние, дифракцию и поляризацию. Следовательно, обладая свойствами и частиц и волн, рентгеновские лучи испытывают два типа рассеяния - волновое рассеяние и комптоновское рассеяние, или другими словами, *когерентное и некогерентное* рассеяние.

При больших энергиях тормозящихся заряженных частиц, тормозное рентгеновское излучение переходит в энергетический диапазон γ - излучения.

При взаимодействии рентгеновских лучей с веществом может происходить фотоэффект, сопровождающее его поглощение рентгеновского излучения и их рассеяние, фотоэффект наблюдается в том случае, когда атом, поглощая рентгеновский фотон, выбрасывает один из своих внутренних электронов, после чего может совершить либо излучательный переход, испустив фотон характеристического излучения, либо выбросить второй электрон при безызлучательном переходе (оже-электрон). Под действием рентгеновских лучей на кристаллы в некоторых узлах атомной решётки появляются ионы с дополнительным положительным зарядом, а вблизи них оказываются избыточные электроны. Такие нарушения структуры кристаллов, называемые рентгеновскими экситонами, являются центрами окраски и исчезают лишь при значительном повышении температуры.

При прохождении излучения через слой вещества, его ослабление происходит за счёт двух процессов: поглощения рентгеновских фотонов веществом и изменения их направления при рассеянии. В длинноволновой области спектра преобладает поглощение рентгеновских лучей, в коротковолновой - их рассеяние. Степень поглощения быстро растёт с увеличением Z и длины волны излучения. Например, жёсткие рентгеновские лучи свободно проникают через слой воздуха ~ 10 см; алюминиевая пластинка в 3 см толщиной ослабляет излучение с длиной волны 0,0027 нм вдвое; мягкие рентгеновские лучи значительно поглощаются в воздухе и их использование и исследование возможно лишь в вакууме или в слабо поглощающем газе (например, He). При поглощении рентгеновских лучей атомы вещества ионизируются.

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

Рентгеновское излучение применяется в медицине (рентгенотерапия, рентгенография), дефектоскопии, спектральном и структурном анализе (рентгеноструктурный анализ), лазеры.

Рентгеновское излучение используется в химии для анализа соединений и в физике для исследования структуры кристаллов. Пучок рентгеновского излучения, проходя через химическое соединение, вызывает характерное вторичное излучение, спектроскопический анализ которого позволяет химику установить состав соединения. При падении на кристаллическое вещество пучок рентгеновских лучей рассеивается атомами кристалла, давая четкую правильную картину пятен и полос на фотопластинке, позволяющую установить внутреннюю структуру кристалла. Применение рентгеновского излучения при лечении рака основано на том, что оно убивает раковые клетки. Однако оно может оказать нежелательное влияние и на нормальные клетки. Поэтому при таком использовании рентгеновского излучения должна соблюдаться крайняя осторожность.

2.3.2 Гамма излучение

Гамма - излучение (γ -излучение) - коротковолновое электромагнитное излучение. На шкале электромагнитных волн оно граничит с жестким рентгеновским излучением, занимая область более высоких частиц. Возникает при распаде радиоактивных ядер и элементарных частиц, взаимодействии быстрых заряженных частиц с веществом, аннигиляции электронно-позитронных пар и др. γ -излучение обладает чрезвычайно малой длиной волны ($\lambda < 10^{-8}$ см) и вследствие этого ярко выраженными корпускулярными свойствами, т.е. ведет себя подобно потоку частиц – гамма квантов, или фотонов, с энергией $h\nu$. Диапазон частот, $3 \cdot 10^{19} - 3 \cdot 10^{21}$ Гц, диапазон длин волн, $10^{-11} - 10^{-13}$ м, основной диапазон энергий для природных нуклидов 0,1 – 2 МэВ.

Гамма-излучение, сопровождающее распад радиоактивных ядер, испускается при переходах ядра из более возбужденного энергетического состояния в менее возбужденное или в основное. Энергия γ – кванта равна разности энергий $\Delta\varepsilon$ состояний, между которыми происходит переход. Испускание ядром γ -кванта не влечет за собой изменения атомного номера или массового числа, в отличие от других видов радиоактивных превращений. Ширина линий γ -излучений чрезвычайно мала ($\sim 10^{-2}$ эВ). Поскольку расстояние между уровнями во много раз больше ширины линий, спектр γ -излучения является линейчатым, т.е. состоит из ряда дискретных линий. Изучение спектров γ -излучения позволяет установить энергии возбужденных состояний ядер. γ -кванты с большими энергиями испускаются при распадах некоторых элементарных частиц. Так, при распаде покоящегося π^0 - мезона возникает γ -излучение с энергией ~ 70 МэВ. γ -излучение от распада элементарных частиц также образует линейчатый спектр. Однако испытывающие распад элементарные частицы часто движутся со скоростями, сравнимыми со скоростью света. Вследствие этого возникает доплеровское уширение линии и спектр гамма-излучения оказывается размытым в широком интервале энергий.

Гамма-излучение, образующееся при прохождении быстрых заряженных частиц через вещество, вызывается их торможением в кулоновском поле атомных ядер вещества. Тормозное γ –излучение, также как и тормозное рентгеновское излучение, характеризуется сплошным спектром, верхняя граница которого совпадает с энергией заряженной частицы, например электрона. В ускорителях заряженных частиц получают тормозное гамма- излучение с максимальной энергией до нескольких десятков ГэВ.

В межзвёздном пространстве гамма-излучение может возникать в результате соударений квантов более мягкого длинноволнового, электромагнитного излучения, например света, с электронами, ускоренными магнитными полями космических объектов. При этом быстрый электрон передает свою энергию электромагнитному излучению и видимый свет превращается в более жесткое гамма-излучение.

Аналогичное явление может иметь место в земных условиях при столкновении электронов большой энергии, получаемых на ускорителях, с фотонами видимого света в интенсивных пучках света, создаваемых лазерами. Электрон передает энергию световому фотону, который превращается в γ -квант. Таким образом, можно на практике превращать отдельные фотоны света в кванты гамма-излучения высокой энергии.

Гамма – лучи - излучение подобное рентгеновскому, но имеющее более короткую длину волны. Благодаря малой длине волны гамма - лучи обладают очень высокой проникающей способностью. Они распространяются в воздухе приблизительно на 2,5 км, и являются основной причиной лучевой болезни при использовании атомного оружия. Наиболее интенсивное гамма-излучение и по энергии, и по количеству фотонов, возникает при β - распаде естественных и искусственных радионуклидов. Фотоны взаимодействуют с электронами атомов и с электрическим полем ядра. Проходя через среду, гамма-излучение ослабляется по экспоненциальному закону, т.е. никогда не поглощается полностью. В этом его отличие от корпускулярного (альфа, бета, нейтронного) излучения. Передача всей энергии гамма- квантов происходит в результате фотоэлектрического поглощения, в результате которого фотон исчезает, а его энергия уходит на отрыв электрона от атома, т.е. его ионизацию. Для фотонов с энергией свыше 1,02 МэВ возможно образование пар электрон-позитрон. Важно, что фотон может отдать электрону лишь часть своей энергии и двигаться дальше в другом направлении.

γ -излучение ионизируют атомы и молекулы тел, разрушают живые клетки, не взаимодействуют с электрическим и магнитным полями. Ионизация, проводимая γ - квантами в среде, примерно в 100 раз ниже ионизации β - частицами. Глубина проникновения в среду зависит от энергии квантов. Самое интенсивное из природных источников γ - излучения ряда тория ослабляется примерно в 20-30 раз слоем воды толщиной 1 м.

γ -излучение применяется в дефектоскопии, при диагностике технологических процессов, для выявления внутренней структуры атомов, в медицинской терапии и диагностики в медицине, для каротажа в геологии, в гамма-лазерах, военном деле и т.п.

2.3.3 Тормозное излучение

Тормозное излучение, электромагнитное излучение, испускаемое заряженной частицей при её рассеянии (торможении) в электрическом поле. Иногда в понятие тормозного излучения включают также излучение релятивистских заряженных частиц, движущихся в макроскопических магнитных полях (в ускорителях, в космическом пространстве), и называют его магнитотормозным; однако более употребительным в этом случае является термин синхротронное излучение.

Согласно классическому электродинамике, которая достаточно хорошо описывает основные закономерности тормозного излучения, его интенсивность пропорциональна квадрату ускорения заряженной частицы. Так как ускорение обратно пропорционально массе m частицы, то в одном и том же поле тормозное излучение легкой заряженной частицы - электрона будет, например, в миллионы раз мощнее излучения

протона. Поэтому чаще всего наблюдается и практически используется тормозное излучение, возникающее при рассеянии электронов на электростатическом поле атомных ядер и электронов; такова, в частности, природа рентгеновских лучей в рентгеновских трубках и гамма-излучения, испускаемого быстрыми электронами при прохождении через вещество.

Спектр фотонов тормозного излучения непрерывен и обрывается при максимально возможной энергии, равной начальной энергии электрона. Интенсивность тормозного излучения пропорциональна квадрату атомного номера Z ядра, в поле которого тормозится электрон (по закону Кулона сила f взаимодействия электрона с ядром пропорциональна заряду ядра Ze , где e - элементарный заряд, а ускорение определяется вторым законом Ньютона: $a = f/m$). При движении в веществе электрон с энергией выше некоторой критической энергии E_0 тормозится преимущественно за счёт тормозного излучения (при меньших энергиях преобладают потери на возбуждение и ионизацию атомов). Например, для свинца $E_0 = 10$ МэВ, для воздуха - 200 МэВ.

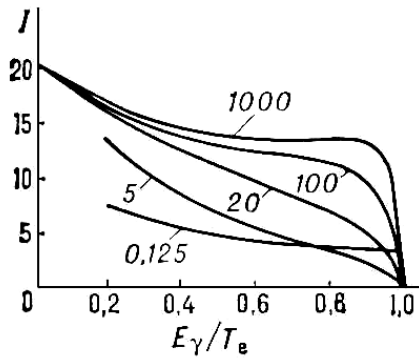


Рис. 8. Теоретические спектры энергии фотонов тормозного излучения (с учётом экранирования) в свинце (4 верхних кривых) и в алюминии (нижняя кривая); цифры на кривых - начальная кинетическая энергия электрона в единицах энергии покоя электрона $m_e c^2 = 0,511$ МэВ (интенсивность дана в относительных единицах).

Рассеяние электрона в электрическом поле атомного ядра и атомных электронов является чисто электромагнитным процессом, и его наиболее точное описание даёт квантовая электродинамика. При не очень высоких энергиях электрона хорошее согласие теории с экспериментом достигается при учёте одного только кулоновского поля ядра. Согласно квантовой электродинамике, в поле ядра существует определённая вероятность квантового перехода электрона в состояние с меньшей энергией с излучением, как правило, одного фотона (вероятность излучения большего числа фотонов мала). Поскольку энергия фотона E_γ равна разности начальной и конечной энергии электрона, спектр тормозного излучения (**Рис. 8**) имеет резкую границу при энергии фотона, равной начальной кинетической энергии электрона T_e . Так как вероятность излучения в элементарном акте рассеяния пропорциональна Z^2 , то для увеличения выхода фотонов тормозное излучение в электронных пучках используются мишени из веществ с большими Z (свинец, платина и т.д.). Угловое распределение тормозного излучения существенно зависит от T_e : в нерелятивистском случае ($T_e \gg m_e c^2$; где m_e - масса электрона, c - скорость света) тормозное излучение подобно излучению электрического диполя, перпендикулярного к плоскости траектории электрона.

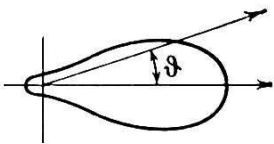


Рис. 9. Угловое распределение тормозного излучения при высоких начальных энергиях электронов ($T_e \gg m_e c^2$).

При высоких энергиях ($T_e \gg m_e c^2$) тормозное излучение направлено вперёд по движению электрона и концентрируется в пределах конуса с угловым раствором порядка $\varphi = m_e c^2 / T_e$ рад (**Рис. 9**); это свойство используется для получения интенсивных пучков фотонов высокой энергии (γ -квантов) на электронных ускорителях. Тормозное излучение является частично поляризованным.

Дальнейшее уточнение теории тормозного излучения достигается учётом экранирования кулоновского поля ядра атомными электронами. Поправки на экранирование, существенные при $T_e \gg m_e c^2$ и $E_\gamma \ll T_e$, приводят к снижению вероятности тормозного излучения (так как при этом эффективное поле меньше кулоновского поля ядра).

На свойства тормозного излучения при прохождении электронов через вещество влияют эффекты, связанные со структурой среды и многократным рассеянием электронов. При $T_e \gg 100$ МэВ многократное рассеяние сказывается ещё и в том, что за время, необходимое для излучения фотона, электрон проходит большое расстояние и может испытать столкновения с другими атомами. В целом многократное рассеяние при больших энергиях приводит в аморфных веществах к снижению интенсивности и расширению пучка тормозного излучения. При прохождении электронов больших энергий через кристаллы возникают интерференционные явления — появляются резкие максимумы в спектре тормозного излучения и увеличивается степень поляризации (**Рис. 10**).

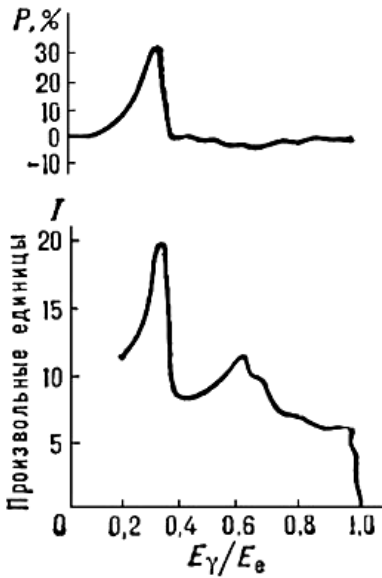


Рис. 10. Поляризация P (верхняя кривая) и энергетический спектр (нижняя кривая) фотонов у тормозного излучения как функция E_γ в единицах полной начальной энергии электрона $E_e = T_e + m_e c^2$ для $E_e = 1$ ГэВ (интенсивность I дана в произвольных единицах).

Причиной значительного тормозного излучения может быть тепловое движение в горячей разреженной плазме (с температурой $10^5 - 10^6$ К и выше). Элементарные акты тормозного излучения, называемые в этом случае тепловым, обусловлены столкновениями заряженных частиц, из которых состоит плазма. Космическое рентгеновское излучение, наблюдение которого стало возможным с появлением искусственных спутников Земли, частично (а излучение некоторых дискретных рентгеновских источников, возможно, полностью) является, по-видимому, тепловым тормозным излучением.

Тормозное рентгеновское и гамма-излучение широко применяются в технике, медицине, в исследованиях по биологии, химии и физике.

2.3.4 Излучение Черенкова-Вавилова

Черенкова – Вавилова излучение – световое излучение, возникающее при движении в веществе электрически заряженных частиц (например, электронов) со скоростью, превышающей фазовую скорость света в этом веществе (скорость распространения световых волн).

В отличие от тормозного излучения, возникающего при неравномерном движении электрических зарядов, черенковское излучение возникает и при равномерном движении, но при скоростях движения электрона, превышающих скорость света в данной среде. Обнаружено в 1934 П.А.Черенковым при исследовании гамма-люминесценции растворов как слабое голубое свечение жидкостей под действием гамма-лучей. Уже первые эксперименты Черенкова, предпринятые по инициативе С.И.Вавилова, выявили ряд характерных особенностей излучения: свечение наблюдается у всех чистых прозрачных жидкостей, причём яркость мало зависит от их химического состава, излучение имеет поляризацию с преимущественной ориентацией электрического вектора вдоль направления первичного пучка, при этом в отличие от люминесценции не наблюдается ни температурного, ни примесного тушения.

Черенкову удалось доказать, что наряду с люминесценцией при облучении жидкостей некоторыми радиоактивными β - и γ -источниками появляется совершенно новый тип свечения, многие характеристики которого прямо противоположны свойствам люминесценции. Здесь интенсивность и спектр излучения почти не зависят от типа вещества, его чистоты и температуры; - излучение связано с движением в среде электронов (это было установлено в специальных опытах, в которых сосуд с исследуемой жидкостью помещали в магнитное поле); излучение поляризовано и направлено вдоль пучка электронов; излучение имеет сплошной спектр, максимум интенсивности приходится на синюю часть спектра; излучение имеет пороговый характер; оно не вызывается, например, рентгеновскими лучами с максимальной энергией 30 кэВ.

Обнаруженное Черенковым свечение носит универсальный характер в том смысле, что под действием излучения с достаточной энергией "светятся" все прозрачные тела, а не только жидкости.

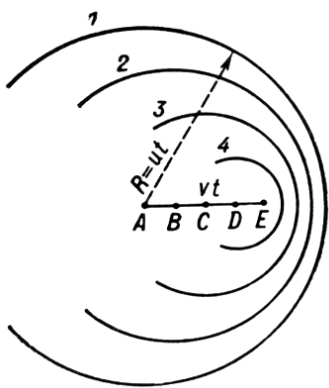


Рис. 11. Движение заряженной частицы в среде со скоростью $v < u$. Сферы 1, 2, 3, 4 — положение парциальных волн, испущенных частицей из точек A, B, C, D, соответственно.

На основании этих данных Вавиловым было сделано основополагающее утверждение, что обнаруженное явление - не люминесценция жидкости, а свет излучают движущиеся в ней быстрые электроны (такие электроны возникают под действием гамма-лучей в результате эффекта Комптона). Излучение Черенкова - Вавилова характерно и для твёрдых тел. Различные виды свечения, вызываемого гамма-лучами, наблюдались после открытия радия неоднократно, в частности, свечение жидкостей под действием гамма-лучей исследовалось (1926-29) французским учёным М.Л.Малле, получившим фотографии его спектра. Однако доказательств того, что это явление новое, не было, не установлено было и наиболее характерное свойство излучения (обнаруженное Черенковым в 1936) - его направленность под острым углом к скорости частицы.

Механизм явления был выяснен в работе И.Е.Тамма и И.М.Франка (1937), содержащей и количественную теорию, основанную на уравнениях классической электродинамики. К тем же результатам привело и квантовое рассмотрение (В.Л.Гинзбург, 1940).

Излучение Черенкова-Вавилова возникает при движении не только электрона в среде, но и любой заряженной частицы, если для неё выполняется условие:

$$v > c/n, \quad ()$$

где скорость движения частицы в среде, c - скорость света в вакууме, а n — показатель преломления света данной среды

Для электронов в жидкостях и твёрдых телах условие () начинает выполняться уже при энергиях $\sim 10^5$ эВ (такие энергии имеют многие электроны радиоактивных процессов). Более тяжёлые частицы должны обладать большей энергией, например протон, масса которого в ~ 2000 раз больше электронной, для достижения необходимой скорости должен обладать энергией $\sim 10^8$ эВ (такие протоны можно получить только в современных ускорителях).

На основе излучения Черенкова - Вавилова разработаны экспериментальные методы, которые широко применяются в ядерной физике как для регистрации частиц, так и для изучения их природы. Это излучение Черенкова-Вавилова, возникающее в атмосфере Земли, служит для изучения космических лучей.

Излучение Черенкова-Вавилова может наблюдаться в чистом виде только в идеальных случаях, когда частица движется с постоянной скоростью в радиаторе неограниченной длины. При пересечении частицей поверхности радиатора возникает т. н. переходное излучение. Оно было теоретически предсказано Гинзбургом и Франком (1946) и впоследствии исследовано экспериментально. Сущность его состоит в том, что электромагнитное поле частицы в вакууме и в среде различны. Любое изменение поля частицы всегда приводит к излучению света. При тормозном излучении, например, оно вызывается изменением скорости частицы, а в случае переходного излучения тем, что меняются электромагнитные свойства среды вдоль траектории частицы. В непрозрачных для света веществах возникающее на их границе переходное излучение играет доминирующую роль, т.к. интенсивность излучения Черенкова-Вавилова снижена его поглощением. Переходное излучение возникает и при малых скоростях частицы или, напротив, при излучении ультрарелятивистской частицы в области частот рентгеновского спектра, где $n < 1$. Интенсивность переходного излучения мала и обычно недостаточна для регистрации отдельной частицы. Для эффективной его регистрации используется суммирование излучения частицы при последовательном пересечении ею нескольких границ раздела.

В 1940 Э. Ферми обобщил теорию излучения Черенкова-Вавилова, приняв во внимание, что реальная среда обладает способностью поглощать свет по крайней мере в некоторых областях спектра. Полученные им результаты внесли существенные уточнения в теорию т. н. ионизационных потерь заряженными частицами (эффект поляризации среды).

Излучение Черенкова-Вавилова является примером оптики «сверхсветовых» скоростей и имеет принципиальное значение. Излучение Черенкова-Вавилова экспериментально и теоретически изучено не только в оптически изотропных средах, но и в кристаллах (оптически анизотропные среды), теоретически рассмотрено излучение электрических и магнитных диполей и мультиполей. Ожидаемые свойства излучения движущегося магнитного заряда были использованы для поисков магнитного монополя. Рассмотрено излучение частицы в канале внутри среды (например, излучение пучка частиц внутри волновода). При излучении Черенкова-Вавилова новые особенности приобретает эффект Доплера в среде: появляются т. н. аномальный и сложный эффекты Доплера. Можно полагать, что всякая система частиц, способная взаимодействовать с электромагнитным полем, будет излучать свет за счёт своей кинетической энергии, если ее скорость превышает фазовую скорость света.

На базе этого излучения черенковскими счётчиками регистрируются многие высокоэнергетические излучения.

Черенковский счетчик – детектор для регистрации частиц, испускающих Черенкова-Вавилова излучение (которое преобразуется в электрический сигнал с помощью фотоэлектронного умножителя). Применяется в ядерной физике и физике частиц высокой энергии.

2.3.5 Синхротронное излучение

Синхротронное излучение, магнитотормозное излучение, излучение электромагнитных волн заряженными частицами, движущимися с релятивистскими скоростями в магнитном поле.

Излучение обусловлено ускорением, связанным с искривлением траекторий частиц в магнитном поле. Аналогичное излучение нерелятивистских частиц, движущихся по круговым или спиральным траекториям, называют циклотронным излучением; оно происходит на основной гиромангнитной частоте и её первых

гармониках. С увеличением скорости частицы роль высоких гармоник возрастает; при приближении к релятивистскому пределу излучение в области наиболее интенсивных высоких гармоник обладает практически непрерывным спектром и сосредоточено в направлении мгновенной скорости в узком конусе с углом раствора $\gamma \sim mc^2/E$ где m и E — масса и энергия частицы, c - скорость света в вакууме.

Полная мощность излучения частицы с энергией $E \gg mc^2$ равна:

$$-\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{2e^4}{3m^4c^7} H_{nep}^2 E^2 = 0,98 * 10^{-3} H_{nep}^2 * \left(\frac{E}{mc^2}\right)^2 \text{ эв/сек} \quad (6)$$

где e — заряд частицы, H_{nep} - составляющая магнитного поля, перпендикулярная скорости частицы. Сильная зависимость излучаемой мощности от массы частицы делает синхротронное излучение наиболее существенным для лёгких частиц - электронов и позитронов.

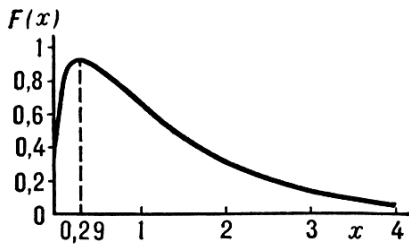


Рис. 12. График функции $F(x)$.

Спектральное распределение излучаемой мощности определяется выражением:

$$P(\nu) = \frac{\sqrt{3}e^3 H_{nep} \nu}{mc^2 \nu_c \nu/\nu_c} \int_0^\infty H_{5/3}(\eta) d\eta \quad (7)$$

где $\nu_c = \frac{3eH_{nep}}{4\pi mc} * \left(\frac{E}{mc^2}\right)^2$, а $H_{5/3}(\eta)$ - цилиндрическая функция

второго рода мнимого аргумента. График функции $F(x) = x \int_x^\infty H_{5/3}(\eta) d\eta$ представлен на **Рис. 12**.

Характерная частота, на которую приходится максимум в спектре излучения частицы, равна (в $гц$).

$$\nu \approx 0,29 * \nu_c = 1,28 * 10^{18} * H_{nep} E^2 \text{ эрг} = 4,6 * 10^{-6} H_{nep} E^2 \text{ эв} \quad (8)$$

Излучение отдельной частицы в общем случае эллиптически поляризовано с большой осью эллипса поляризации, расположенной перпендикулярно видимой проекции магнитного поля. Степень эллиптичности и направление вращения электрического вектора зависят от направления наблюдения по отношению к конусу, описываемому вектором скорости частицы вокруг направления магнитного поля. Для направлений наблюдения, лежащих на этом конусе, поляризация линейная.

Синхротронное излучение первоначально наблюдалось от электронов в циклических ускорителях, в частности в синхротроне, откуда оно и получило название. Потери энергии на синхротронное излучение, а также связанные с синхротронным излучением квантовые эффекты в движении частиц необходимо учитывать при конструировании циклических ускорителей электронов высокой энергии. Синхротронное излучение циклических ускорителей электронов используется для получения интенсивных пучков поляризованного электромагнитного излучения в ультрафиолетовой области спектра и в области «мягкого» рентгеновского излучения; пучки рентгеновского синхротронного излучения применяются, в частности, в рентгеновском структурном анализе.

Большой интерес представляет синхротронное излучение космических объектов, в частности нетепловой радиодифон Галактики, нетепловое радио- и оптическое излучение дискретных источников (сверхновых звезд, пульсаров, квазаров, радиогалактик). Синхротронная природа этих излучений подтверждается особенностями их спектра и поляризации. Согласно современным представлениям, релятивистские электроны, входящие в состав космических лучей, дают синхротронное излучение в космических магнитных полях в радио-, оптическом, а возможно, и в рентгеновском диапазонах. Измерения спектральной интенсивности и поляризации космических синхротронных излучений позволяют получить информацию о концентрации и энергетическом спектре релятивистских электронов, величине и направлении магнитного поля в удалённых частях Вселенной.

2.3.6 Переходное излучение

Переходное излучение - излучение, возникающее при пересечении заряженной частицей границы между двумя средами с разными электромагнитными константами.

Выше уже упоминалось, что заряд, движущийся равномерно и прямолинейно, не может излучать электромагнитные волны: излучает только заряд, движущийся с ускорением. Это верно, если заряд находится в вакууме. Если же заряд перемещается в веществе с постоянной скоростью, превышающей фазовую скорость распространения света в этой среде, то возникает черенковское излучение. А может ли излучать

заряд, движущийся без ускорения с досветовой скоростью? Рассматривая, как образуется черенковское излучение, мы считали путь заряженной частицы в среде достаточно длинным, оставив без ответа вопрос, что происходит при входе частицы в черенковский радиатор. Между тем, поведение частицы на входе в черенковский радиатор или в общем случае при пересечении границы двух сред с различными электрическими и/или магнитными свойствами, как оказалось, представляет самостоятельный интерес. При переходе заряда из одного вещества в другое возникает новый тип электромагнитного излучения, которое было названо переходным. Оно сопровождает частицы, движущиеся со скоростью как большей, так и меньшей фазовой скорости света.

Переходное излучение применяется для регистрации ультрарелятивистских заряженных частиц - в основном самых легких: электронов и позитронов. При этом используется излучение только в области рентгеновских частот. Именно по интенсивности переходного излучения или числу зарегистрированных рентгеновских фотонов отличают электроны и позитроны от более тяжелых частиц. Идентификация электронов и позитронов представляет важную задачу в физике высоких энергий. Дело в том, что время жизни большинства элементарных частиц столь мало, что они не могут быть зарегистрированы непосредственно, и изучить их свойства можно только путем регистрации продуктов распада. Многие из очень интересных для физиков частиц распадаются с испусканием электронов и/или позитронов.

Детектор переходного излучения состоит из нескольких модулей радиатор-детектор рентгеновских фотонов. Радиатор состоит из большого числа пленок с малым средним атомным номером Z . Последнее существенно для уменьшения поглощения излучения в радиаторе, связанного главным образом с фотоэффектом: коэффициент поглощения рентгеновских фотонов пропорционален Z^4 . Отметим, что интенсивным источником переходного излучения могут быть не только регулярные стопки из пленок или пластинок, но и микропористые материалы из полиэтилена, полиуретана, полистирола и других органических соединений.

3. СВОЙСТВА ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Частицы и кванты, образующиеся при радиоактивном распаде ядер элементов, по-разному взаимодействуют с окружающей средой. Эти взаимодействия абсолютно не зависят от вида элемента, а лишь от свойств (масса, энергия, заряд, частота и т.д.) самих частиц.

Основными свойствами радиоактивных излучений являются:

- способность проникать через вещества;
- ионизация вещества среды;
- выделение тепла при радиоактивном распаде;
- действие на фотоэмульсию;
- способность вызывать свечение люминесцирующих веществ;
- способность вызывать химические реакции и распад молекул (при длительном воздействии излучений изменяется окраска окружающих предметов).

Все эти свойства и используются при обнаружении и регистрации излучений, т.к. ни одно из шести чувств человека воздействию ионизирующих излучений не улавливает. Неспособность человека обнаружить радиацию создает вокруг радиоактивных излучений целую ауру таинственности и опасности, и значительно усложняет взаимоотношения общества с предприятиями и органами управления атомной промышленностью.

γ -лучи, α - и β -частицы обладают различной проникающей способностью. Пробег α -частицы в воздухе не превышает нескольких сантиметров; β -частицы могут пройти в воздухе несколько метров, а γ -кванты – десятки, сотни метров. При внешнем облучении человека α -частицы полностью задерживаются поверхностным слоем кожи, поэтому они не представляют опасности до тех пор, пока радиоактивные вещества, испускающие α -частицы, не попадут внутрь организма через открытую рану, с пищей или с воздухом, тогда они становятся чрезвычайно опасными. β -частицы не могут проникнуть в глубь человеческого организма больше, чем на несколько миллиметров (глубина проникновения 1 - 2 см). Проникающая способность γ -излучения, которое распространяется со скоростью света, очень велика: его может задержать лишь толстая свинцовая или бетонная плита. γ -кванты вызывают облучение всего тела.

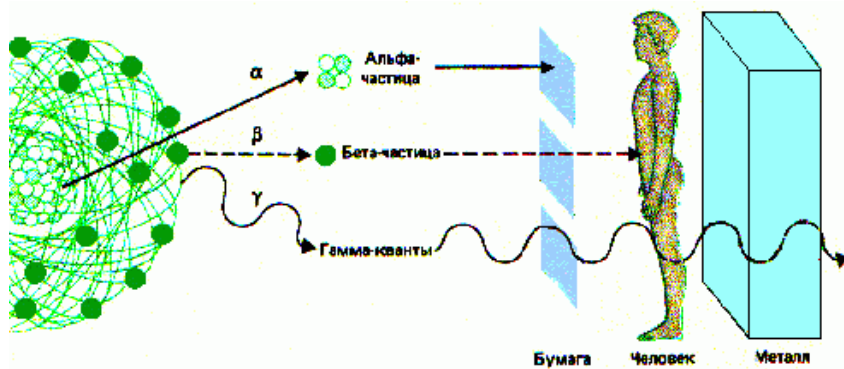


Рис. 13. Три вида излучений и их проникающая способность

4. ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Источником ионизирующего излучения может быть космический объект, земной объект, содержащий радиоактивный материал, или техническое устройство, испускающее или способное (при определенных условиях) испускать ионизирующее излучение. Источниками ИИ могут быть природные и искусственные радиоактивные вещества, различного рода ядерно-технические установки, медицинские препараты, многочисленные контрольно-измерительные устройства (дефектоскопия металлов, контроль качества сварных соединений). Они используются также в сельском хозяйстве, геологической разведке, при борьбе со статическим электричеством и др.

Любой источник излучения характеризуется:

1. Видом излучения – основное внимание уделяется наиболее часто встречающимся на практике источникам γ -излучения, нейтронов, β^- , β^+ , α -частиц.

2. Геометрией источника (формой и размерами) – геометрически источники могут быть точечными и протяженными. Протяженные источники представляют суперпозицию точечных источников и могут быть линейными, поверхностными или объемными с ограниченными, полубесконечными или бесконечными размерами. Физически точечным можно считать такой источник, максимальные размеры которого много меньше расстояния до точки детектирования и длины свободного пробега в материале источника (ослаблением излучения в источнике можно пренебречь). Поверхностные источники имеют толщину много меньшую, чем расстояние до точки детектирования и длина свободного пробега в материале источника. В объемном источнике излучатели распределены в трехмерной области пространства.

3. Мощностью и ее распределением по источнику – источники излучения наиболее часто распределяются по протяженному излучателю равномерно, экспоненциально, линейно или по косинусоидальному закону.

4. Энергетическим составом – энергетический спектр источников может быть моноэнергетическим (испускаются частицы одной фиксированной энергии), дискретным (испускаются моноэнергетические частицы нескольких энергий) или непрерывным (испускаются частицы разных энергий в пределах некоторого энергетического диапазона).

5. Угловым распределением излучения – среди многообразия угловых распределений излучений источников для решения большинства практических задач достаточно рассматривать следующие: изотропное, косинусоидальное, мононаправленное. Иногда встречаются угловые распределения, которые можно записать в виде комбинаций изотропных и косинусоидальных угловых распределений излучений. (На практике источники встречаются в неограниченном многообразии указанных характеристик.)

4.1 Терминология: радиоактивные источники излучений и их характеристики

Источник ионизирующего излучения - объект, содержащий радиоактивный материал или техническое устройство, испускающее или способное в определенных условиях испускать ионизирующее излучение.

Радионуклидный источник ионизирующего излучения - источник ионизирующего излучения, содержащий радиоактивный материал.

Источник - все, что может вызывать облучение при испускании ионизирующего излучения или выбросе радиоактивных веществ или материалов, и могут рассматриваться как единый источник в целях радиационной защиты и безопасности. Например, вещества, выделяющие радон, являются источниками, существующими в окружающей среде, гамма-облучающая установка для лучевой стерилизации является источником, используемым в практической деятельности для сохранения пищевых продуктов, рентгеновская установка может быть источником, используемым в практической деятельности в целях радиодиагностики, а атомная электростанция является источником в практической деятельности при производстве электроэнергии с использованием ядерного деления; - все они могут рассматриваться в качестве источников (т.е., в плане сбросов в окружающую среду) или в качестве группы источников (в целях

профессиональной радиационной защиты). В общем смысле термин источник (и особенно, закрытый источник) подразумевает радиоактивный источник небольшой интенсивности, который может использоваться в медицинских целях или в промышленных приборах.

Естественный источник: Возникший естественным путем источник ионизирующего излучения, такой как солнце и звезды (источники космического излучения), скалы и почва (наземные источники ионизирующего излучения).

Закрытый источник: Радиоактивное вещество, которое (а) постоянно находится в герметичной капсуле, или (б) жестко связано и находится в твердом состоянии. Термин специальная форма радиоактивного материала, используемый в контексте транспортировки радиоактивных материалов, имеет очень похожий смысл.

Открытый источник - любой источник, который не подходит под определение закрытого источника.

Источник выброса - выражение для обозначения информации о реальном или потенциальном выбросе радиоактивного материала из данного источника, обычно в случае аварии. Это может включать информацию о присутствующих радионуклидах, составе, количестве, мощности и способе выброса материала.

Нуклид - вид атомов с данными числами протонов и нейтронов в ядре, характеризующийся массовым числом A (атомной массой) и атомным номером Z .

Изотоп - нуклид с числом протонов в ядре, свойственным данному элементу.

Радионуклид - нуклид, обладающий радиоактивностью.

Радиоизотоп - изотоп, обладающий радиоактивностью.

Радиоактивность - самопроизвольное превращение неустойчивого нуклида в другой нуклид, сопровождающееся испусканием ионизирующего излучения.

Внешнее излучение источника - поток ионизирующих частиц, выходящих из радионуклидного источника излучения через его рабочую поверхность.

Закрытый источник - радиоактивный источник излучения, устройство которого исключает поступления содержащихся в нем радиоактивных веществ в окружающую среду в условиях применения и износа, на которые он рассчитан.

Открытый источник - радиоактивный источник излучения, при использовании которого возможно поступление содержащихся в нем радиоактивных веществ в окружающую среду.

Техногенный источник - источник ионизирующего излучения, специально созданный для его полезного применения или являющийся побочным продуктом этой деятельности.

Природный источник - источник природного происхождения, на который распространяется действие НРБ и ОСПОРБ.

Образцовый источник - радиоактивный источник излучения, служащий для проверки по нему других источников и (или) приборов для измерения ионизирующих излучений и утвержденный (аттестованный) в качестве образцового в установленном порядке.

Контрольный источник - радиоактивный источник излучения, служащий для проверки работоспособности и стабильности приборов для измерения ионизирующих излучений.

Промышленный источник - для облучательных установок, лучевой терапии, промышленной дефектоскопии, стерилизации, дезинфицирования продуктов, обеззараживания отходов.

Точечный источник - радиоактивный источник излучения с линейными размерами, пренебрежимо малыми по сравнению с расстоянием между источником и детектором и длиной свободного пробега частиц в материале источника (пренебрежимо малыми самопоглощением и саморассеянием излучения).

4.2 Классификация источников излучения.

4.2.1 Источники рентгеновского излучения.

Источниками рентгеновского излучения является рентгеновская трубка, некоторые радиоактивные изотопы (одни из них непосредственно испускают рентгеновские лучи, ядерные излучения других (электроны или α -частицы) бомбардируют металлическую мишень, которая испускает рентгеновские лучи), Интенсивность рентгеновского излучения изотопных источников на несколько порядков меньше интенсивности излучения рентгеновской трубки, но габариты, вес и стоимость изотопных источников несравненно меньше, чем установки с рентгеновской трубкой. Источниками мягких рентгеновских лучей с l порядка единиц и десятков нм могут служить синхротроны и накопители электронов с энергиями в несколько Гэв, а также лазеры. По интенсивности рентгеновское излучение синхротронов превосходит в указанной области спектра излучение рентгеновской трубки на 2 - 3 порядка. Естественные источники рентгеновских лучей – солнечная корона и другие космические объекты.

Приемниками рентгеновского излучения могут быть фотопленка, люминесцентные экраны, детекторы ядерных излучений.

Электронная пушка - устройство для создания направленного потока электронов; применяется в телевизионных трубках, рентгеновской аппаратуре, электронных микроскопах. В телевизионном приемнике электронная пушка используется для развертки изображения по экрану кинескопа.

Рентгеновская трубка - электровакуумный прибор для получения рентгеновских лучей. Простейшая рентгеновская трубка состоит из стеклянного баллона с впаянными электродами - катодом и анодом (антикатодом). Электроны, испускаемые катодом, ускоряются сильным электрическим полем в пространстве между электродами и бомбардируют анод. При ударе электронов об анод их кинетическая энергия частично преобразуется в энергию рентгеновского излучения.

Рентгеновские трубки различают: по способу получения потока электронов — с термоэмиссионным катодом, автоэмиссионным катодом, катодом, подвергаемым бомбардировке положительными ионами и с радиоактивным (β) источником электронов; по способу вакуумирования — отпаянные, разборные; по времени излучения — непрерывного действия, импульсные; по типу охлаждения анода — с водяным, масляным, воздушным, радиационным охлаждением; по размерам фокуса (области излучения на аноде) - макрофокусные, острофокусные и микрофокусные; по его форме - кольцевой, круглой, линейчатой формы; по способу фокусировки электронов на анод - с электростатической, магнитной, электромагнитной фокусировкой.

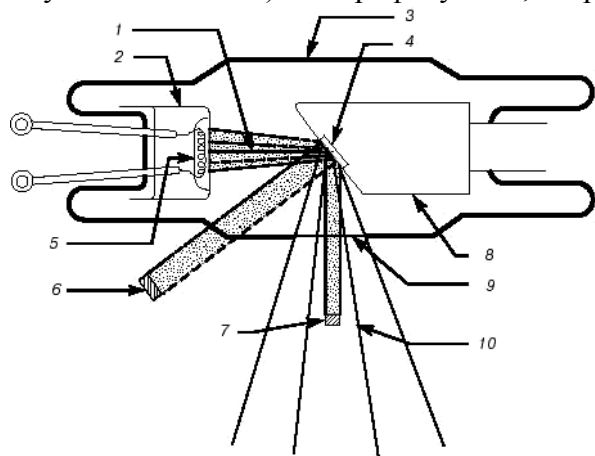


Рис. 14. Рентгеновская трубка Кулиджа. При бомбардировке электронами вольфрамовой антикатод испускает характеристическое рентгеновское излучение. Поперечное сечение рентгеновского пучка меньше реально облучаемой площади. 1 – электронный пучок; 2 – катод с фокусирующим электродом; 3 – стеклянная оболочка (трубка); 4 – вольфрамовая мишень (антикатод); 5 – нить накала катода; 6 – реально облучаемая площадь; 7 – эффективное фокальное пятно; 8 – медный анод; 9 – окно; 10 – рассеянное рентгеновское излучение.

В рентгеновской трубке, разработанной Кулиджем (**Рис. 14**), источником электронов является вольфрамовый катод, нагреваемый до высокой температуры. Электроны ускоряются до больших скоростей высокой разностью потенциалов между анодом (или антикатодом) и катодом. Поскольку электроны должны достичь анода без столкновений с атомами, необходим очень высокий вакуум, для чего нужно хорошо откачать трубку. Этим также снижаются вероятность ионизации оставшихся атомов газа и обусловленные ею побочные токи.

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

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

Рентгеновские трубки применяют в рентгеновском структурном анализе, рентгеновском спектральном анализе, дефектоскопии рентгенодиагностике, рентгенотерапии, рентгеновской микроскопии и микрорентгенографии. Наибольшее применение во всех областях находят отпаянные рентгеновские трубки с термоэмиссионным катодом, водоохлаждаемым анодом, электростатической системой фокусировки электронов. Термоэмиссионный катод рентгеновской трубки обычно представляет собой спираль или прямую нить из вольфрамовой проволоки, накаливаемую электрическим током. Рабочий участок анода - металлическая зеркальная поверхность — расположен перпендикулярно или под некоторым углом к потоку электронов. Для получения сплошного спектра рентгеновского излучения высоких энергий и интенсивности используют аноды из Au, W; в структурном анализе пользуются рентгеновские трубки с анодами из Ti, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Mo, Ag. Основные характеристики рентгеновской трубки - предельно допустимое ускоряющее напряжение (1-500 кВ), электронный ток (0,01 мА — 1А), удельная мощность, рассеиваемая анодом ($10\text{--}10^4$ Вт/мм²), общая потребляемая мощность (0,002 Вт — 60 кВт) и размеры фокуса (1 мкм — 10 мм). Кпд рентгеновской трубки составляет 0,1—3%.

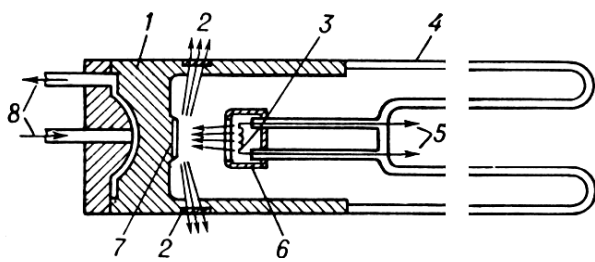


Рис. 15. Схема рентгеновской трубки для структурного анализа: 1 - металлический анодный стакан (обычно заземляется); 2 - окна из бериллия для выхода рентгеновского излучения; 3 - термоэмиссионный катод; 4 — стеклянная колба, изолирующая анодную часть трубки от катодной; 5 - выводы катода, к которым подводится напряжение накала, а также высокое (относительно анода) напряжение; 6 - электростатическая система фокусировки электронов; 7 - анод (антикатод); 8 - патрубки для ввода и

вывода проточной воды, охлаждающей анодный стакан.

При обычном способе получения рентгеновского излучения получают широкий диапазон длин волн, который называют рентгеновским спектром.

Рентгеновские спектры - спектры испускания и поглощения рентгеновских лучей, т. е. электромагнитного излучения в области длин волн от 10^{-5} до 10^2 нм.

В спектре присутствуют ярко выраженные компоненты (**Рис. 7**) - спектр излучения рентгеновской трубки представляет собой наложение тормозного и характеристического рентгеновского спектра.

Тормозной рентгеновский спектр возникает при торможении заряженных частиц, бомбардирующих мишень. Интенсивность тормозного спектра быстро растет с уменьшением массы бомбардирующих частиц и достигает значительной величины при возбуждении электронами. Тормозной рентгеновский спектр - сплошной, так как частица может потерять при тормозном излучении любую часть своей энергии. Он непрерывно распределён по всем длинам волн l , вплоть до коротковолновой границы $l_0 = hc/eV$ (h — постоянная Планка, c — скорость света, e — заряд бомбардирующей частицы, V — пройденная ею разность потенциалов). С возрастанием энергии частиц интенсивность тормозного рентгеновского спектра растет, а l_0 смещается в сторону коротких волн (**Рис. 16**). С увеличением порядкового номера Z атомов мишени I также растет.

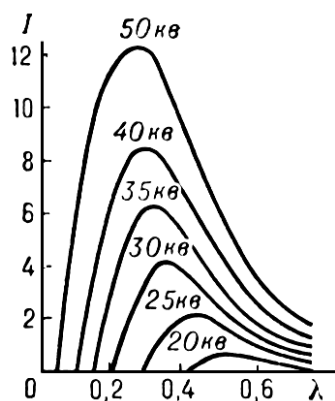


Рис. 16. Распределение интенсивности I тормозного излучения W по длинам волн l при различных напряжениях V на рентгеновской трубке.

Широкий «континуум» называют непрерывным спектром или белым излучением. Налагающиеся на него острые пики называются характеристическими рентгеновскими линиями испускания. Хотя весь спектр есть результат столкновений электронов с веществом, механизмы возникновения его широкой части и линий разные. Вещество состоит из большого числа атомов, каждый из которых имеет ядро, окруженное электронными оболочками, причем каждый электрон в оболочке атома данного элемента занимает некоторый дискретный уровень энергии. Обычно эти оболочки, или энергетические уровни, обозначают символами K , L , M и т.д., начиная от ближайшей к ядру оболочки. Когда налетающий электрон, обладающий достаточно большой энергией, соударяется с одним из связанных с атомом электронов, он выбивает этот электрон с его оболочки. Опустевшее место занимает другой электрон с оболочки, которой соответствует большая энергия. Этот последний отдает избыток энергии, испуская рентгеновский фотон. Поскольку электроны оболочек имеют дискретные значения энергии, возникающие рентгеновские фотоны тоже обладают дискретным спектром. Этому соответствуют острые пики для определенных длин волн, конкретные значения которых зависят от элемента-мишени. Так как энергии E_1 начального и E_2 конечного состояний атома квантованы, возникает линия рентгеновского спектра с частотой $\nu = (E_1 - E_2)/h$. Все возможные излучательные квантовые переходы атома из начального K -состояния образуют наиболее жесткую (коротковолновую) K -серию. Аналогично образуются L -, M -, N -серии.

Таким образом, характеристические линии образуют K -, L - и M -серии, в зависимости от того, с какой оболочки (K , L или M) был удален электрон. Соотношение между длиной волны рентгеновского излучения и атомным номером называется законом Мозли.

Если электрон наталкивается на относительно тяжелое ядро, то он тормозится, а его кинетическая энергия выделяется в виде рентгеновского фотона примерно той же энергии. Если же он пролетит мимо ядра, то потеряет лишь часть своей энергии, а остальную будет передавать попадающим на его пути другим атомам. Каждый акт потери энергии ведет к излучению фотона с какой-то энергией. Возникает непрерывный рентгеновский спектр, верхняя граница которого соответствует энергии самого быстрого электрона. Таков механизм образования непрерывного спектра, а максимальная энергия (или минимальная длина волны),

фиксирующая границу непрерывного спектра, пропорциональна ускоряющему напряжению, которым определяется скорость налетающих электронов. Спектральные линии характеризуют материал бомбардируемой мишени, а непрерывный спектр определяется энергией электронного пучка и практически не зависит от материала мишени.

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

Рентгеновский спектр поглощения получают, пропуская первичное рентгеновское излучение непрерывного спектра через тонкий поглотитель. При этом распределение интенсивности по спектру изменяется - наблюдаются скачки и флуктуации поглощения, которые и представляют собой рентгеновский спектр поглощения.

4.2.2 Ускорители

Ускорители заряженных частиц – установки для получения заряженных частиц (электронов, протонов, атомных ядер, ионов) больших энергий с помощью электрического поля.

Частицы движутся в вакуумной камере; управление их движением (формой траектории) производится магнитным (реже электрическим) полем. По характеру траекторий частиц различают циклические и линейные ускорители, а по характеру ускоряющего электрического поля - резонансные и нерезонансные ускорители (последние – индукционные и высоковольтные). К циклическим относятся ускорители электронов: бетатрон, микротрон, синхротрон и ускорители тяжелых частиц (протонов и др.): циклотрон, фазотрон и протонный синхротрон. Все циклические ускорители, за исключением бетатрона, - резонансные. Линейные высоковольтные ускорители дают интенсивные пучки частиц с энергией до 30 МэВ. Самую высокую энергию электронов дают линейные резонансные ускорители (20 ГэВ), протонов – протонный синхротрон (500 ГэВ). Помимо первичных пучков ускоренных заряженных частиц, ускорители являются источником пучков вторичных частиц (мезонов, нейтронов, фотонов и т.д., получаемых при взаимодействии первичных частиц с веществом. Ускоритель – один из основных инструментов современной физики. Пучки частиц высокой энергии используются для исследования природы и свойств элементарных частиц, в физике атомного ядра и твердого тела, а также в дефектоскопии, лучевой терапии, радиационного синтеза и др.

Бетатрон – циклический ускоритель электронов, в котором электроны ускоряются вихревым электрическим полем, порожденным переменным магнитным полем. Обычно энергия электронов в бетатроне не выше 50 МэВ.

Синхротрон – ускоритель электронов с орбитой постоянного радиуса, растущим во времени магнитным полем, определяющим этот радиус, и постоянной частотой ускоряющего электрического поля. В современных синхротронах достигнуты энергии 20 ГэВ.

Синхрофазотрон (- одновременно и - фазотрон) – протонный синхротрон – ускоритель протонов с орбитой постоянного радиуса, растущим во времени магнитным полем, определяющим этот радиус, и переменной частотой ускоряющего электрического поля. Максимальная энергия протонов в современном синхрофазатроне 800 ГэВ.

Фазотрон – циклический резонансный ускоритель тяжелых заряженных частиц (протонов, дейтронов и др.), в котором управляющее магнитное поле постоянно во времени, а частота ускоряющего электрического поля меняется.

4.2.3 Нейтронные источники

Нейтронные источники – устройства, в которых идут ядерные реакции с образованием нейтронов.

Нейтроны образуются при различных ядернофизических процессах.

Любой источник излучения характеризуется:

1. Видом излучения – основное внимание уделяется наиболее часто встречающимся на практике источникам γ -излучения, нейтронов, β^- , β^+ , α -частиц.

2. Геометрией источника (формой и размерами) – геометрически источники могут быть точечными и протяженными. Протяженные источники представляют суперпозицию точечных источников и могут быть линейными, поверхностными или объемными с ограниченными, полубесконечными или бесконечными размерами. Физически точечным можно считать такой источник, максимальные размеры которого много меньше расстояния до точки детектирования и длины свободного пробега в материале источника (ослаблением излучения в источнике можно пренебречь). Поверхностные источники имеют толщину много меньшую, чем расстояние до точки детектирования и длина свободного пробега в материале источника. В объемном источнике излучатели распределены в трехмерной области пространства.

3. Мощностью и ее распределением по источнику – источники излучения наиболее часто распределяются по протяженному излучателю равномерно, экспоненциально, линейно или по косинусоидальному закону.

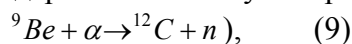
4. Энергетическим составом – энергетический спектр источников может быть моноэнергетическим (испускаются частицы одной фиксированной энергии), дискретным (испускаются моноэнергетические частицы нескольких энергий) или непрерывным (испускаются частицы разных энергий в пределах некоторого энергетического диапазона).

5. Угловым распределением излучения – среди многообразия угловых распределений излучений источников для решения большинства практических задач достаточно рассматривать следующие: изотропное, косинусоидальное, мононаправленное. Иногда встречаются угловые распределения, которые можно записать в виде комбинаций изотропных и косинусоидальных угловых распределений излучений.

Портативные нейтронные источники могут быть созданы при использовании ядер, подвергающихся спонтанному делению или тех, которые испускают нейтроны в результате ядерных реакций. Все они дают небольшие потоки.

Известно, что фотоядерные реакции ${}^2\text{H}(\gamma, n){}^3\text{H}$ и ${}^9\text{Be}(\gamma, n){}^8\text{Be}$ имеют наименьшие пороговые энергии: 2,2 и 1,63 МэВ соответственно. Поэтому смесь ${}^{124}\text{Sb}$ и Be используют в качестве источников нейтронов, поскольку радиоактивное ядро испускает γ -лучи с энергией 1,71 и 2,04 МэВ и имеет период полураспада 60 дней. Источник испускает быстрые нейтроны, которые при необходимости замедляют графитом или парафином. Источник ${}^{124}\text{Sb}$ активностью 1 кюри, запаянный в бериллиевой капсуле, может дать выход 10^4 нейтрон/(см²·с).

Портативные нейтронные источники, использующие реакцию (α, n) , дают большие потоки, но являются более дорогостоящими, чем фотоядерные. Используется реакция:



Но источник α -частиц определяется ценой, доступностью и необходимостью экранировать γ -излучения. Для этой цели были предложены полоний, радий, актиний, плутоний и америций. Из них полоний даёт наименьшее количество γ -квантов, но является летучим элементом и поэтому несколько труден в обращении. Источник испускает быстрые нейтроны с максимумом энергии в области 3-5 МэВ.

Лучшим ампульным источником является ${}^{252}\text{Cf}$, имеющий период полураспада 2,6 года. Он подвергается спонтанному делению, и источник весом 10 мг даёт $3 \cdot 10^{10}$ н/с со средней энергией нейтронов 1,5 МэВ.

Замечание. Существуют нейтронные размножители, представляющие собой подкритические урановые сборки, в 100-1000 раз увеличивающие поток Ро-Be-источника.

Пучки протонов и дейтронов из ускорителей также могут быть использованы для получения нейтронов. Наиболее эффективными реакциями конверсии являются ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$, ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$ и ${}^9\text{Be}(d, n){}^{10}\text{B}$, но нейтроны освобождаются и при бомбардировке многих других лёгких элементов. Эти нейтроны являются более или менее моноэнергетичными при энергии бомбардирующих частиц порядка 10^6 эВ. Ускоритель Конкрофта-Уолтона даёт поток быстрых нейтронов $2 \cdot 10^{10}$ н/(см²·с), а ускоритель Ван де Граафа – поток тепловых нейтронов – $2,5 \cdot 10^8$ нейтронов. Фотоделение ${}^{235}\text{U}$ генерирует $3 \cdot 10^{17}$ н/с в импульсе продолжительностью 0,2 мксек. Эти нейтроны имеют среднюю энергию 0,8 МэВ и сопровождаются очень интенсивным потоком γ -квантов с энергией 30 МэВ от линейного ускорителя. Подобные импульсные нейтронные источники применяют для активации ядер с очень короткими периодами полураспада.

Ни один из упомянутых выше нейтронных источников нельзя сравнить по интенсивности с большим ядерным реактором, дающим потоки нейтронов порядка 10^{15} н/(см²·с). Не все нейтроны в реакторе являются тепловыми, т.е. с энергией, близкой 0,025 эВ, имеются также надтепловые нейтроны с энергией до 1 МэВ и с быстрые нейтроны с энергией выше 1 МэВ. Отношение быстрых нейтронов к медленным в активной зоне реактора зависит от типа ядерного горючего, замедлителя и геометрии системы. В активной зоне реактора обычно большой поток γ -излучения. Большинство реакторов работает при высокой температуре, что препятствует облучению жидкостей, биологических материалов и полимеров.

Российский стандарт (ГОСТ 21171-80 Генераторы нейтронов. Типы и параметры) распространяется на генераторы нейтронов, предназначенные для элементного и изотопного анализа состава веществ; радиационного воздействия на вещества с целью изменения их физических, химических свойств и изотопного состава; исследования физических и химических свойств вещества; поиска, распознавания сред, веществ и материалов и устанавливает их типы, основные параметры.

Табл. 2. Типы нейтронных генераторов в зависимости от характера изменения потока нейтронов от времени.

Тип	Наименование	Область применения
НГП	Генератор постоянного потока нейтронов	Для радиационного воздействия на вещества с целью изменения их физико химических свойств и изотопного состава, исследования физических и химических свойств веществ
НГМ	Генератор модулированного потока нейтронов	Для радиационного воздействия на вещества с целью изменения их физико химических свойств и изотопного состава, исследования физических и химических свойств веществ. Для определения элементного состава вещества, поиска и распознавания сред вещества и материалов.
НГИ	Генератор импульсного потока нейтронов	Для радиационного воздействия на вещества с целью изменения их физических и химических свойств. Для определения элементного состава вещества, поиска и распознавания сред вещества и материалов.

Табл. 3. Параметры российских нейтронных генераторов.

Основной параметр	Значение параметра для типа		
	НГП	НГМ	НГИ
1. Максимальная энергия нейтронов в мишени, МэВ	2,5±0,5; 14±1,0	2,5±0,5; 14±1,0	2,5±0,5; 14±1,0
2. Поток нейтронов, нейтр/с	[1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ⁴ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ⁵ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ⁶ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ⁷ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ⁸ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ⁹ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ¹⁰ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ¹¹ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ¹² [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ¹³ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ¹⁴		
3. Плотность потока нейтронов на поверхности источника излучения генератора нейтронов, нейтр/(с·см ²)	[1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ⁴ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ⁵ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ⁶ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ⁷ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ⁸ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ⁹ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ¹⁰ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ¹¹ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ¹² [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0; 10,0] × 10 ¹³		
4. Ускоряющее напряжение, кВ	[1,00; 1,12; 1,40; 1,50; 1,60; 1,80; 2,00; 3,00; 4,00; 4,50; 4,75; 5,00; 5,60; 6,00; 7,10; 7,50; 8,00; 8,50; 9,00; 9,50; 10,00] × 10 ¹ [1,00; 1,40; 1,50; 1,60; 1,80; 2,00; 3,00; 4,00; 4,50; 4,75; 5,00; 5,60; 6,00; 7,10; 7,50; 8,00; 8,50; 9,00; 9,50; 10,00] × 10 ²		
Основной параметр	Значение параметра для типа		
	НГП	НГМ	НГИ
5. Длительность импульсов нейтронного излучения, мкс		[1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 9,5; 10,0] × 10 ⁻³ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 9,5; 10,0] × 10 ⁻² [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 9,5; 10,0] × 10 ⁻¹ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 9,5; 10,0] × 10 ⁰ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 9,5; 10,0] × 10 ¹ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 9,5; 10,0] × 10 ² [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 9,5; 10,0] × 10 ³ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 9,5; 10,0] × 10 ⁴ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 9,5; 10,0] × 10 ⁵ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 9,5; 10,0] × 10 ⁶	
6. Частота следования импульсов нейтронного излучения, имп/с	—	[1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 10,0] × 10 ⁰ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 10,0] × 10 ¹ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 10,0] × 10 ² [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 10,0] × 10 ³ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 10,0] × 10 ⁴ [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 10,0] × 10 ⁵	
7. Допускаемая погрешность потока нейтронов, %	0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0; 5,0; 10,0		0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0; 5,0; 10,0; 20,0
8. Допустимое уменьшение потока нейтронов, плотности потока нейтронов выбирается из ряда:	[1,0; 2,0; 5,0; 10,0] × 10 ⁰ [1,0; 2,0; 5,0; 10,0] × 10 ¹		[1,0; 2,0; 5,0; 10,0] × 10 ¹ [1,0; 2,0; 5,0; 10,0] × 10 ²

Табл. 4. Термины, используемые в стандарте

Термин	Пояснение
Генератор нейтронов	Техническое устройство, способное испускать нейтроны и содержащее управляемый источник частиц, бомбардирующих мишень
Генератор постоянного потока (НПП)	Генератор, поток нейтронов которого не изменяется в течение интервала времени работы
Генератор модулированного потока нейтронов (НГМ)	Генератор, поток нейтронов которого регулярно изменяется во времени работы по заданному синусоидальному или другому периодическому временному закону или сохраняется постоянным
Генератор импульсного потока нейтронов (НГИ)	Генератор, поток нейтронов которого возникает периодически с заданной частотой и скважностью, причем в промежутках между импульсами нейтроны не образуются
Поток нейтронов генератора	Количество нейтронов, испускаемых генератором в единицу времени в угол 4Пср. Примечание. Плотность потока нейтронов выражается в нейтр/м ² ·с
Плотность потока нейтронов генератора	Количество нейтронов, проходящих через единицу поверхности в единицу времени. Примечание. Плотность потока нейтронов выражается в нейтр/м ² ·с
Мишень генератора нейтронов	Элемент технического устройства, содержащий изотоп, взаимодействие которого с бомбардирующими частицами приводит к образованию нейтронов
Быстрые нейтроны	Нейтронное излучение с энергией в интервале от 200 кэВ до 20 МэВ по ГОСТ 15484
Выход нейтронов в импульсе	Количество нейтронов, испускаемых генератором за импульс в угол 4Пср. Примечание. Выход нейтронов в импульсе генератора выражается в нейтр/имп

К основным параметрам относятся: максимальная энергия нейтронов в мишени; плотность нейтронов, плотность потоков нейтронов на поверхности источника излучения генератора нейтронов; ускоряющее напряжение; длительность импульсов нейтронного излучения; частота следования импульсов нейтронного излучения; допустимое уменьшение потока нейтронов, плотности потока нейтронов; допускаемая погрешность потока нейтронов.

В нормативных документах на конкретный генератор указывается тип ядерной реакции получения нейтронов, метод измерения потока быстрых нейтронов с энергией 14 МэВ и методика расчёта, а также выход нейтронов в импульсе.