

ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Алейников В.Е.

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ПОЛЕ

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.).

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ПОЛЕ

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

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ПОЛЕ

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.

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

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ПОЛЕ

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} .

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ПОЛЕ

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.

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ПОЛЕ

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.

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ПОЛЕ

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

Ионизирующее излучение, состоящее до взаимодействия со средой из первичного направленного излучения, а после взаимодействия с ней - из части первичного излучения, не испытавшего взаимодействия со средой.

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

Ионизирующее излучение, состоящее до взаимодействия со средой из первичного направленного излучения, а после взаимодействия с ней - из части первичного излучения, не испытавшего взаимодействия со средой, и рассеянного излучения.

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

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ПОЛЕ

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:

$$\Phi = dN/dS.$$

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ПОЛЕ

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 немоноэнергетического фотонного излучения.

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

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ПОЛЕ

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.

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ПОЛЕ

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.

ВИДЫ ИЗЛУЧЕНИЙ

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 нейтральные 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.**

ВИДЫ ИЗЛУЧЕНИЙ

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).

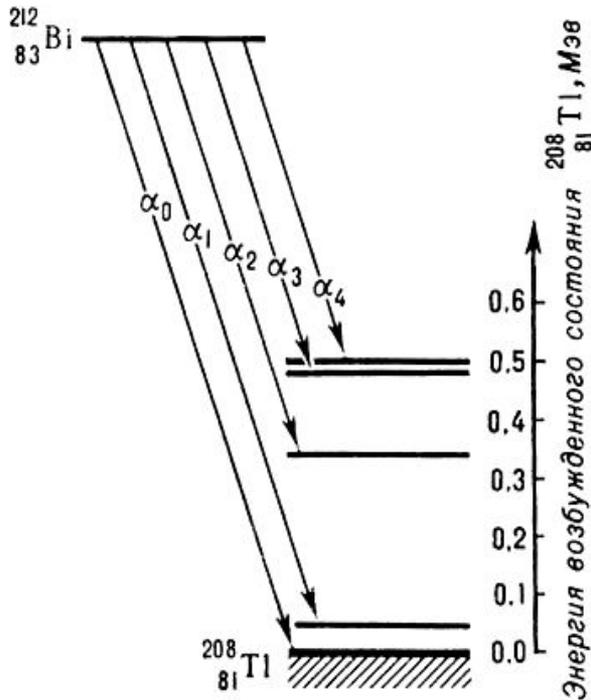
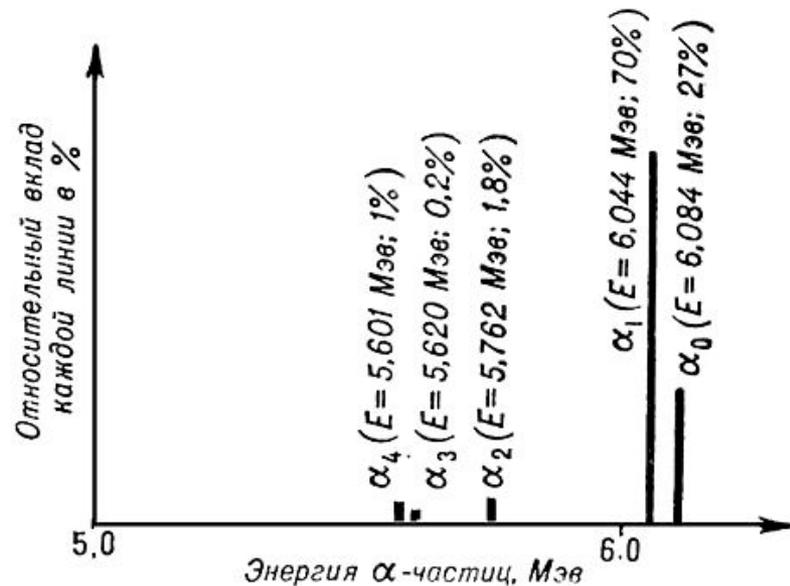


Схема распада ^{212}Bi .



Энергетический спектр α -частиц

ВИДЫ ИЗЛУЧЕНИЙ

Альфа-излучение

α-частицы представляют собой положительно заряженные ядра гелия 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.

ВИДЫ ИЗЛУЧЕНИЙ

Протонное, нейтронное излучения

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

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)**.

ВИДЫ ИЗЛУЧЕНИЙ

Нейтронное излучения

Источниками нейтронного излучения являются:

- спонтанно делящиеся **радионуклиды**;
- специально изготовленные радионуклидные **источники нейтронов**;
- **ускорители** электронов, протонов, ионов;
- **ядерные реакторы**;
- **космическое излучение**.

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

ВИДЫ ИЗЛУЧЕНИЙ

Нейтронное излучения

Нейтроны не **обладают электрическим зарядом.**

Условно нейтроны в зависимости от кинетической энергии разделяются на

- сверхбыстрые (нейтроны высоких энергий) (более 20 МэВ),
- быстрые (от 0,1 до 10 -20 МэВ),
- 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.**

ВИДЫ ИЗЛУЧЕНИЙ

Нейтронное излучения

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	$t_n = (885,4 \pm 0,9_{\text{stat}} \pm 0,4_{\text{syst}}) \text{ с}$

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.

ВИДЫ ИЗЛУЧЕНИЙ

Бета-излучение

Электронное излучение - пучок электронов на выходе электронного ускорителя или электронной пушки. Характеризуется средней энергией излучения и дисперсией (разбросом), а также шириной пучка.

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.

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).

ВИДЫ ИЗЛУЧЕНИЙ

Бета-излучение

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.

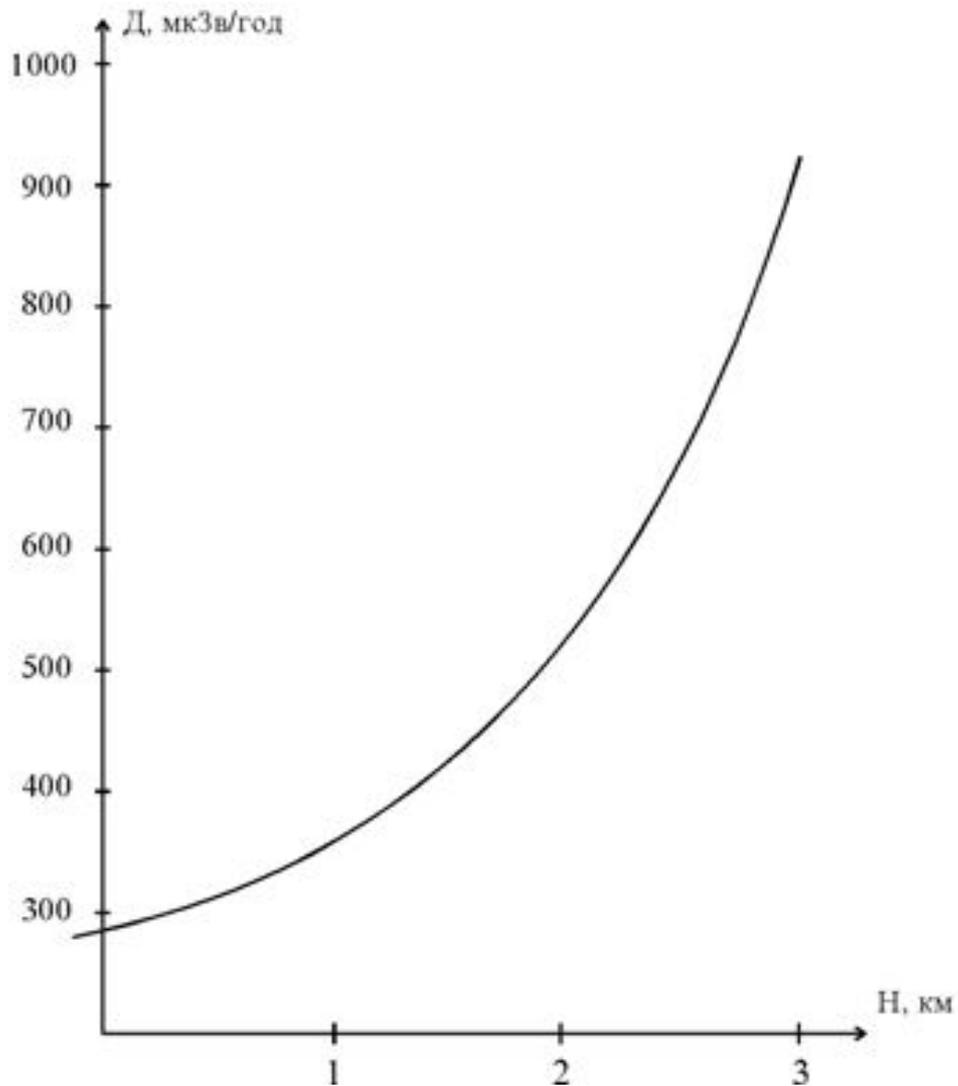
Космическое излучение

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

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.

Космическое излучение



Изменение годовой дозы космического облучения в зависимости от абсолютной высоты

Электромагнитное излучение

Излучение электромагнитное - процесс образования свободного электромагнитного поля.

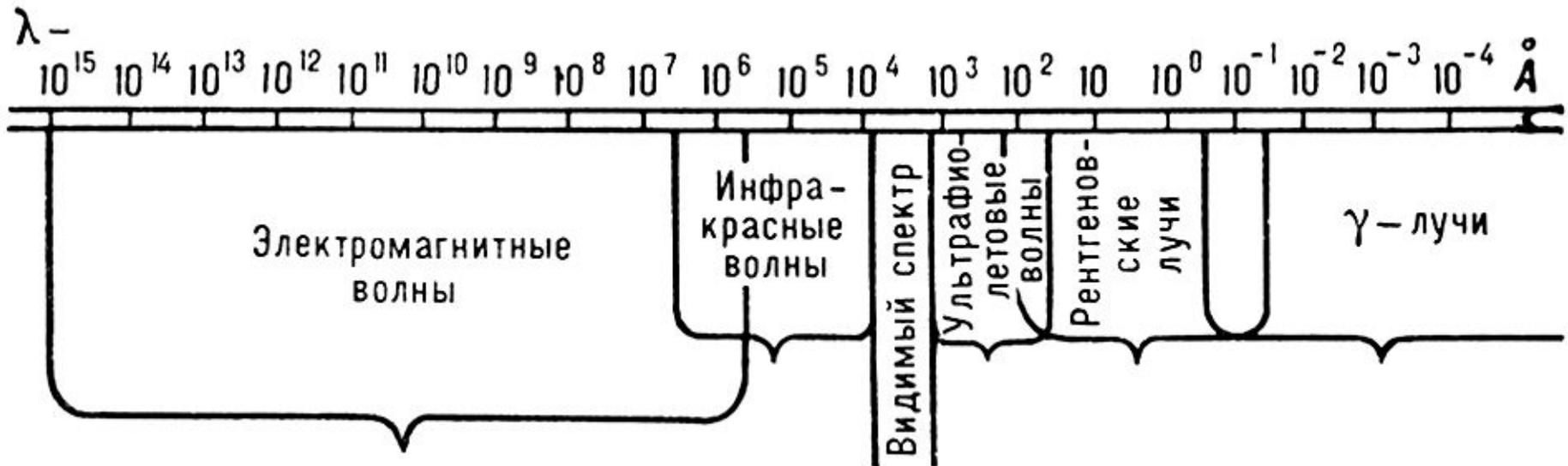


Рис. Длины волн, характерные для различных видов электромагнитного излучения.

Электромагнитное излучение

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.

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

Электромагнитное излучение

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.

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**

Рентгеновское излучение

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.

Рентгеновское излучение

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.

Рентгеновское излучение

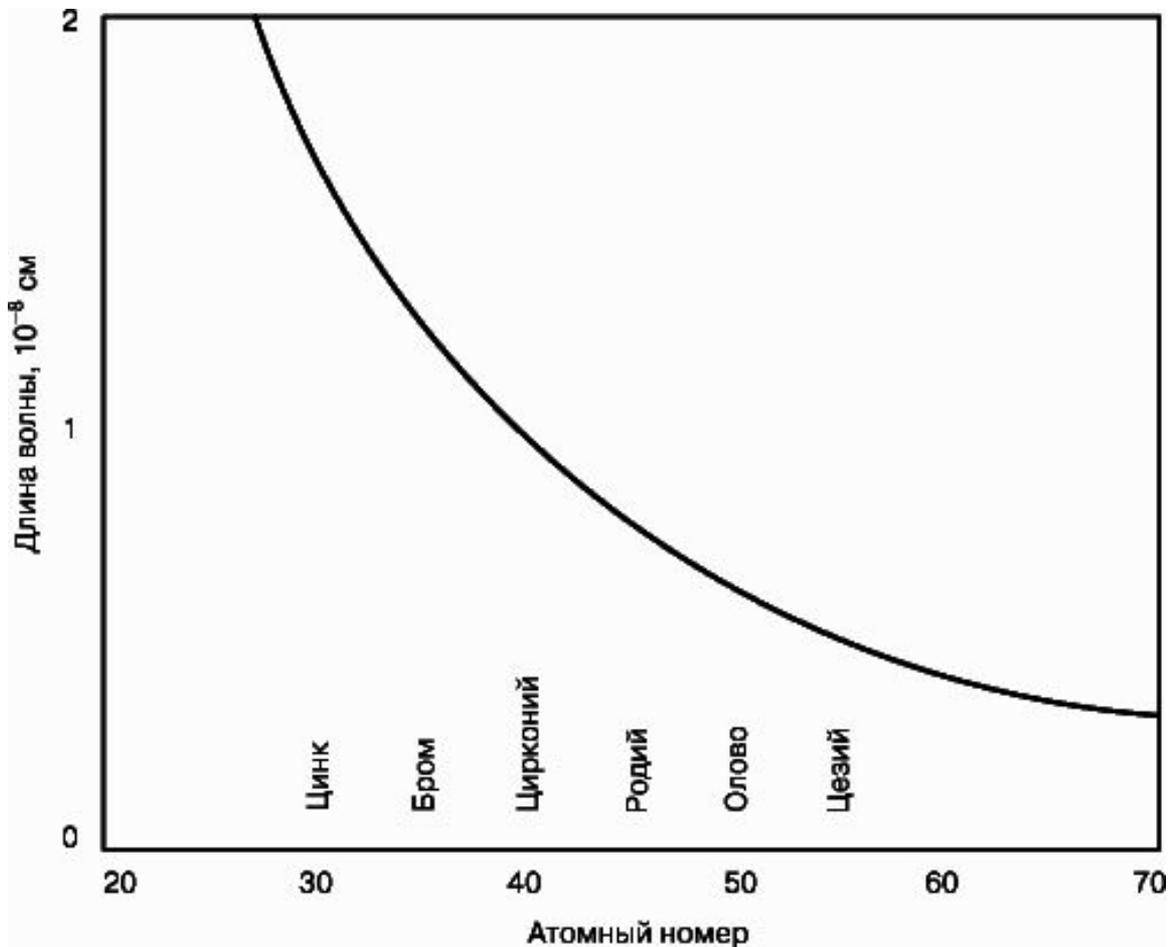


Рис. Длина волны характеристического рентгеновского излучения, испускаемого химическими элементами, зависит от атомного номера элемента. Кривая соответствует закону Мозли: чем больше атомный номер элемента, тем меньше длина волны характеристической линии.

Рентгеновское излучение

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.

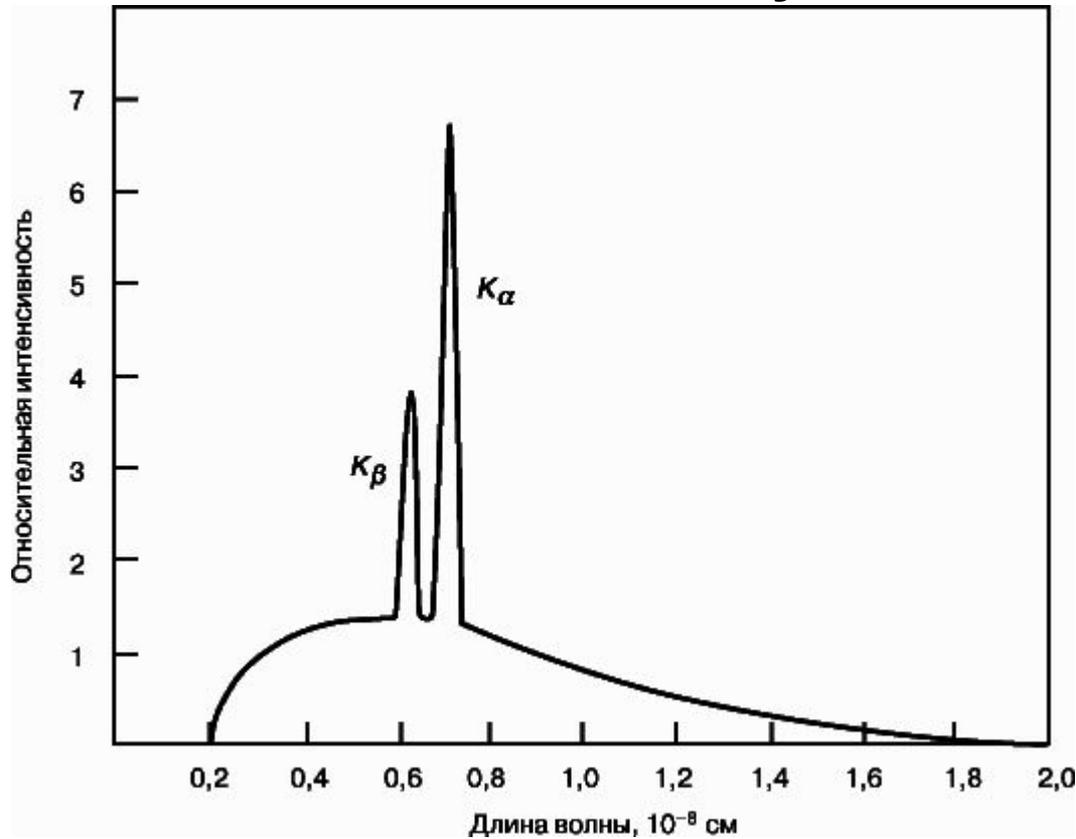
Интенсивность тормозных рентгеновских лучей распределена по всем частотам до высокочастотной границы ν_0 , на которой энергия фотонов $h\nu_0$ (h — Планка постоянная) равна энергии eV бомбардирующих электронов (e — заряд электрона, V — разность потенциалов ускоряющего поля, пройденная ими). Этой частоте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

Рентгеновское излучение

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.

Спектр тормозного излучения непрерывен, максимальная энергия равна начальной энергии частицы.

Рентгеновское излучение

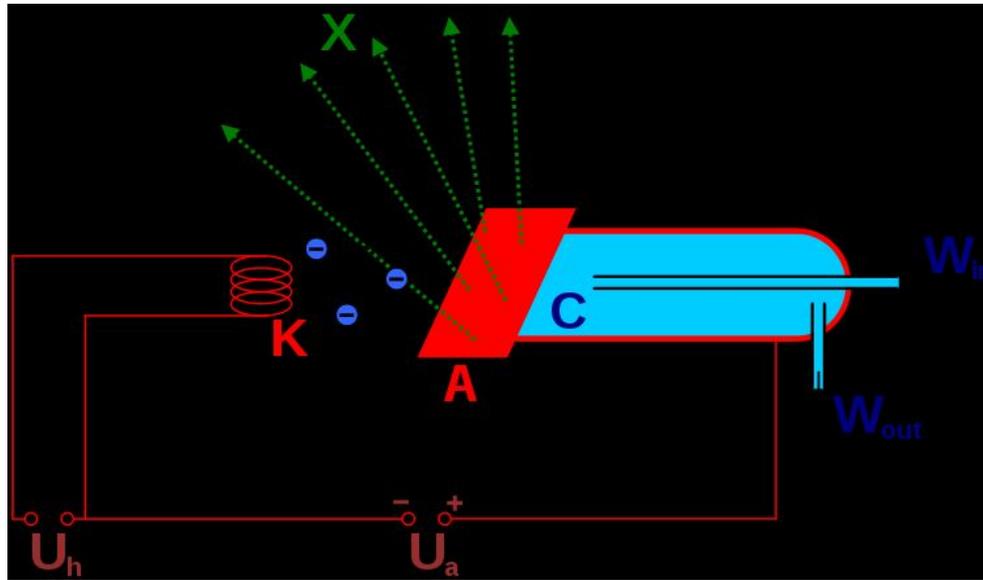


Типичный рентгеновский спектр.

Обычный рентгеновский спектр состоит из непрерывного спектра (континуума) и характеристических линий (острые пики).

Линии K_{α} и K_{β} возникают вследствие взаимодействий ускоренных электронов с электронами внутренней K-оболочки.

Традиционный метод генерации рентгеновских лучей - бомбардировка металлического электрода в вакуумной трубке пучком ускоренных электронов.



X – рентгеновские лучи, K – катод, A – анод, C – теплоотвод, U_h – напряжение накала катода, U_a – ускоряющее напряжение, W_{in} – впуск водяного охлаждения, W_{out} – выпуск водяного охлаждения. В рентгеновской трубке электроны, испущенные катодом, ускоряются под действием разности электрических потенциалов между анодом и катодом (при этом рентгеновские лучи не испускаются, так как ускорение слишком мало) и ударяются об анод, где происходит их резкое торможение. При этом за счёт тормозного излучения происходит генерация излучения рентгеновского диапазона.

Рентгеновское излучение

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.

Рентгеновское излучение

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.**

Рентгеновское излучение

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 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.

Гамма излучение

Гамма - излучение (γ -излучение) - коротковолновое электромагнитное излучение. На шкале электромагнитных волн оно граничит с жестким рентгеновским излучением, занимая область более высоких энергий.

Возникает при

- распаде радиоактивных ядер и элементарных частиц,
- взаимодействии быстрых заряженных частиц с веществом,
- аннигиляции электронно-позитронных пар и др.

Гамма излучение

Гамма-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,
- длин волн, $10^{-11} - 10^{-13}$ м
- энергий для природных нуклидов 0,1 – 2 МэВ.

Гамма излучение

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 ($\approx 10^{-2}$ 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.

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**.**

Тормозное излучение

Согласно классическом электродинамике, которая достаточно хорошо описывает основные закономерности тормозного излучения, его интенсивность пропорциональна квадрату ускорения заряженной частицы.

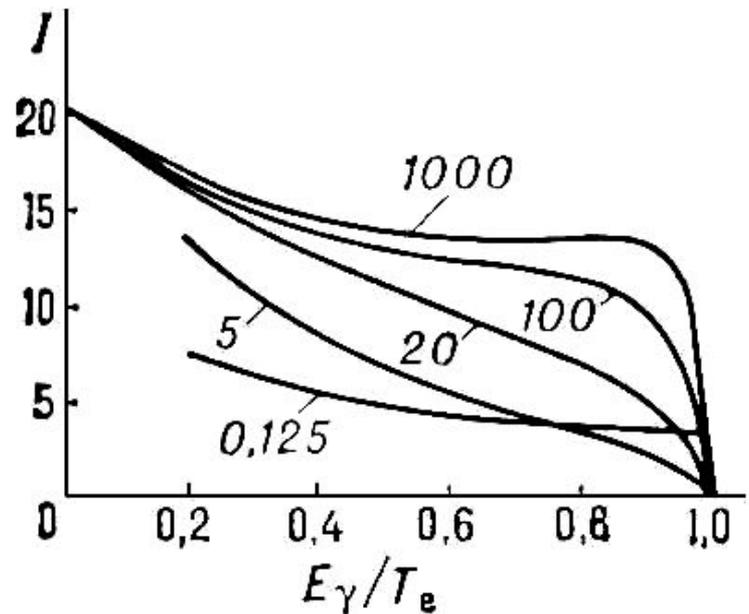
Так как ускорение обратно пропорционально массе m частицы, то в одном и том же поле тормозное излучение легчайшей заряженной частицы - электрона будет, например, в миллионы раз мощнее излучения протона.

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 $E_0 = 10$



Спектры энергии фотонов тормозного излучения 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).

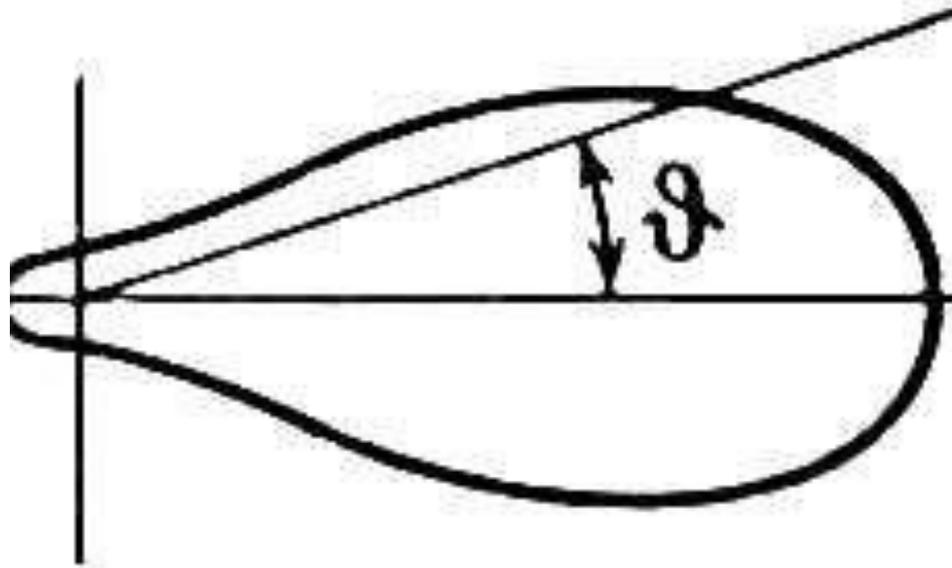
Тормозное излучение

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 энергии электрона, T_e :

- **в нерелятивистском случае** тормозное излучение подобно излучению электрического диполя, перпендикулярного к плоскости траектории электрона.
- **при высоких энергиях** ($T_e \gg m_e c^2$; где m_e - масса электрона, c - скорость света) **тормозное излучение направлено вперёд** по движению электрона и концентрируется в пределах конуса с угловым раствором порядка $m_e c^2 / T_e$ радиан.

Тормозное излучение



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

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.

Излучение Черенкова-Вавилова

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

$$v > c/n,$$

где v - 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 возникновения излучения 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

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.

Синхротронное излучение

С увеличением скорости частицы при приближении к релятивистскому пределу излучение обладает практически непрерывным спектром и **сосредоточено в направлении мгновенной скорости** в узком конусе с углом раствора $\gamma \approx mc^2/E$ где m и E — масса и энергия частицы, c - скорость света в вакууме.

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

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

где e — заряд частицы, $H_{\text{пер}}$ - составляющая магнитного поля, перпендикулярная скорости частицы.

Сильная зависимость излучаемой мощности от массы частицы делает синхротронное излучение наиболее **существенным для лёгких частиц - электронов и позитронов.**

Синхротронное излучение

Синхротронное излучение первоначально наблюдалось от электронов в **циклических ускорителях**, в частности в синхротроне, **откуда оно и получило название**. Синхротронное излучение циклических ускорителей электронов используется

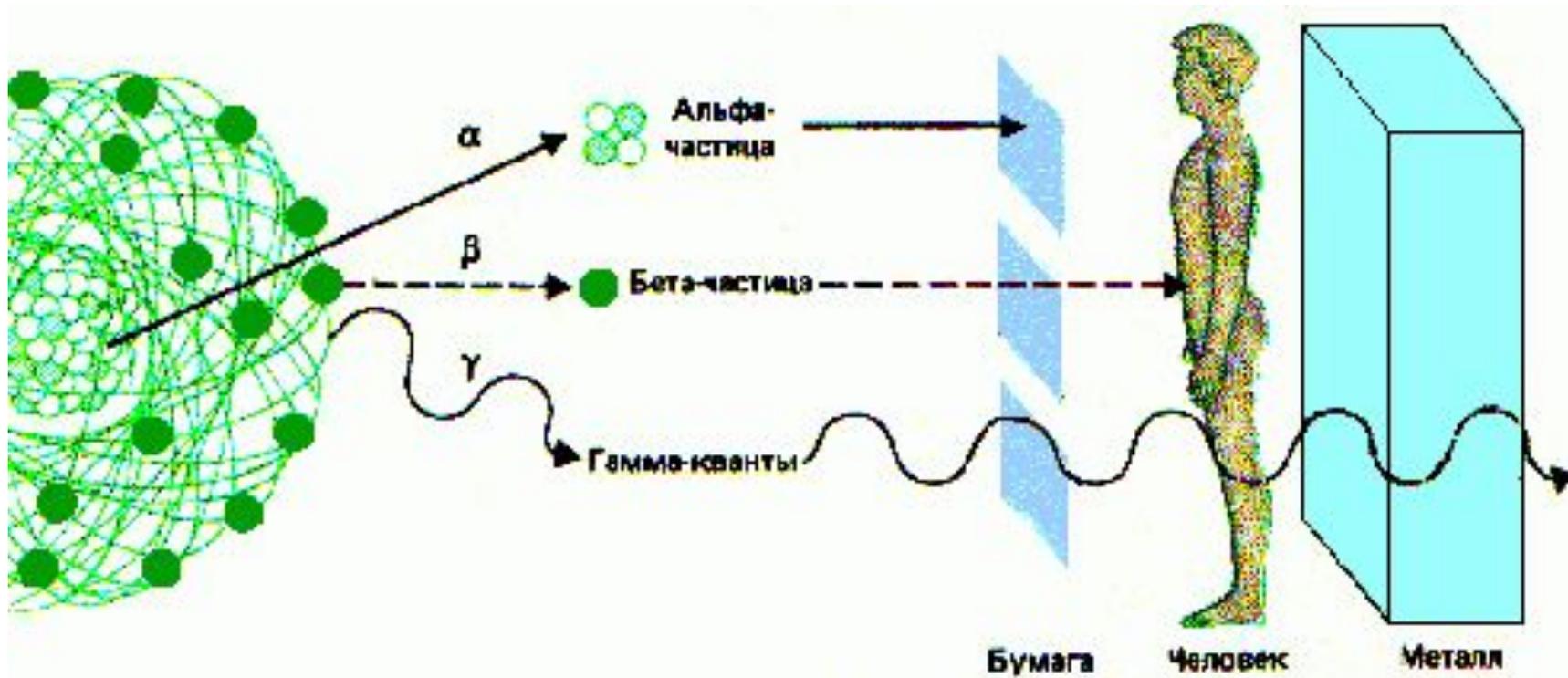
- для получения интенсивных пучков электромагнитного излучения в ультрафиолетовой области спектра и в области «мягкого» рентгеновского излучения;
- пучки рентгеновского синхротронного излучения применяются, в частности, в рентгеновском структурном анализе.

СВОЙСТВА ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

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.



Три вида излучений и их проникающая способность

ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Источником ионизирующего излучения может быть

- ❖ космический объект,
- ❖ земной объект, содержащий радиоактивный материал,
- ❖ 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).

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

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 излучения 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 об-ом источнике излучатели распределены в

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

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 моноэнергетические частицы одной энергии),

□ **дискретным** (испускаются моноэнергетические частицы нескольких энергий),

□ **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,**
- **моноподнаправленное.**

Иногда встречаются угловые распределения, которые можно записать в виде комбинаций изотропных и косинусоидальных

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.

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

Терминология

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.

Закрытый источник: Радиоактивное вещество, которое (а) постоянно находится в герметичной капсуле или

(б) жестко связано и находится в твердом состоянии.

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 - любой источник, который не подходит под определения закрытого источника.

Терминология

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.

Терминология

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

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

Классификация источников излучения.

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 / 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.**

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

Нейтронные источники

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

Нейтроны образуются при различных ядернофизических процессах.

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.

Нейтронные источники

Источники нейтронов по реакции (α, n)

Изотопные (радионуклидные) источники - устройства, в которых идут ядерные реакции с образованием нейтронов. Эти источники представляют собой однородную спрес-сованную смесь α -активного вещества обычно с порошком металлического бериллия или бора.

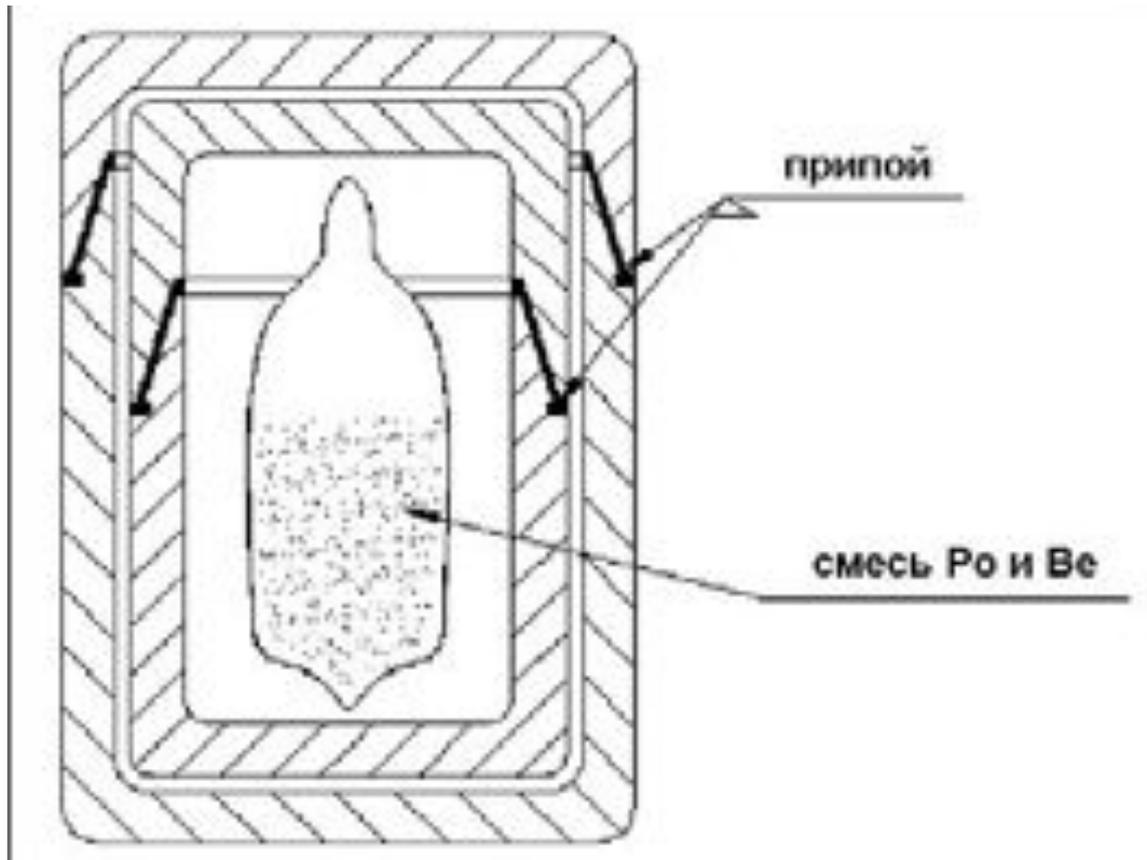
α -излучателями служат полоний-210, радий-226, америций-241, плутоний-238, плутоний-239, кюрий-248 и калифорний-252.

Источники с радием в виде α -излучателя дают нейтроны по реакции (α, n), вызываемой α -частицами как собственно ^{226}Ra , так и продуктов его распада. Преимущество источника – большой срок службы (период полураспада радия 1620 лет), недостаток – интенсивное сопутствующее гамма-излучение.

В источнике происходит ядерная реакция:



Нейтронные источники Источники нейтронов по реакции (α, n)



Полониево-бериллиевый источник нейтронов представляет собой механическую **смесь полония и бериллия**. Нейтроны испускаются ядрами бериллия под воздействием альфа-частиц, образующихся при распаде полония. **Полоний-210** - практически чистый **альфа-излучатель** с энергией **5,305 МэВ** и периодом полураспада **138.4 суток**.

Нейтронные источники
Источники нейтронов по реакции (α, n)

Преимущество полониевых источников состоит в том, что они имеют менее интенсивное γ -излучение (1 γ -квант/нейтрон), чем радиевые источники (10^4 γ -квант/нейтрон).

Основной недостаток - небольшой срок службы, определяемый периодом полураспада полония, однако, этот недостаток можно рассматривать как преимущество. В связи с относительно небольшим периодом полураспада при использовании полония-210 в изделиях практически не возникает проблемы долговременного хранения радиоактивных отходов.

Выход нейтронов (α,n)-источников, представляющих собой однородную смесь α -излучателя с массой $M(\alpha)$ и вещества-мишени с массой $M(B)$ можно оценить по формуле:

$$N = N_0 \frac{M(B)}{M(B) + M(\alpha)}$$

Величины N_0 (выходы при бесконечно большом отношении $M(B)$ к $M(\alpha)$) приведены в Табл.

Мишень	Выход нейтронов на 10^4 α-частиц
Be	50÷80
B	19÷24

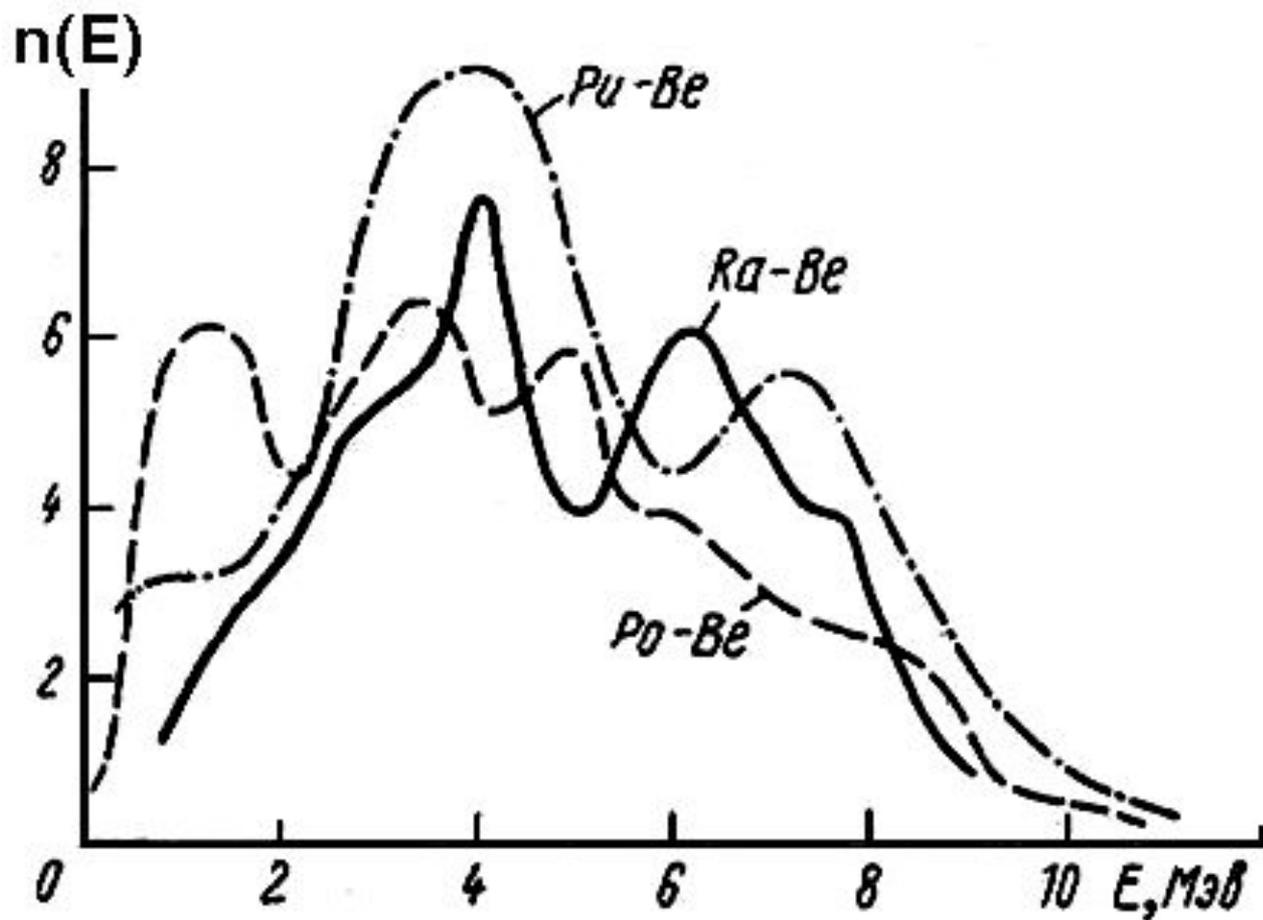
Основные характеристики некоторых (α , n)- источников.

Источники	$T_{1/2}$	$N_{0n} \times 10^6$ ** нейтрон (кюри·сек)	Число γ -кван- тов на 1 нейтрон	Средняя энергия нейтронов, Мэв	Макси- мальная энергия нейтронов Мэв
Ra— α —Be*	1620 лет	17	$\sim 10^4$	3,63	13,2
Rn— α —Be	3,825 дня	15			13,2
Po— α —Be	138,4 »	1÷3	$\sim 1\div 2$	4,3	10,89
Pu— α —Be	24 360 лет	1,7	$\sim 1\div 2$	4,5	10,74
Ra— α —B*	1 620 »	6,8	$\sim 2,5 \cdot 10^4$		
Po— α —B	138,4 дня	0,9		2,7	5,0

* Радий в равновесии с основными дочерними продуктами распада.

** N_0 — выход нейтронов при бесконечно большом отношении массы вещества-мишени к массе α -излучателя.

Нейтронные источники
Источники нейтронов по реакции (α, n)



Энергетические спектры (α, n) – источников нейтронов.

Источник нейтронов на основе калифорния

Лучшим ампульным источником является ^{252}Cf . Изотоп, **Калифорний-252**, полученный искусственно группой американских ученых в 1950 году, **дает смешанное альфа-нейтронное излучение. Калифорний-252 имеет период полураспада 2,6 года. При этом самопроизвольно делится 3 % всех атомов и при каждом делении выделяется четыре нейтрона.** Вот именно такая нейтронная эмиссия и делает ^{252}Cf интересным, ибо 1 г в секунду выделяет $2,4 \cdot 10^{12}$ нейтронов. **Это соответствует нейтронному потоку среднего ядерного реактора!** Если бы такое нейтронное излучение захотели получить классическим путем **из радиево-бериллиевого источника**, то для этого потребовалось бы **200 кг радия**. Столь огромного запаса радия не существует на Земле. Даже такое невидимое глазом количество, как 1 мкг ^{252}Cf , дает более 2 миллионов нейтронов в секунду. Поэтому ^{252}Cf в последнее время используют в медицине в качестве точечного источника нейтронов с большой плотностью потока для локальной обработки злокачественных опухолей.

Источник нейтронов на основе калифорния

Изотопный источник ^{252}Cf обладает следующими

преимуществами:

- постоянство величины потока (не требуется мониторинг);
- длительный ресурс (более трех лет);
- сравнительно низкая стоимость и
- “точечность” источника (его габариты малы по сравнению с геометрией облучения и измерения).

Среди **недостатков** ^{252}Cf

- ✓ ограничения по порогу реакции взаимодействия и по измерительным возможностям;
- ✓ радиационная опасность в эксплуатации (постоянно действующий излучатель) и
- ✓ необходимость мер радиационной защиты при хранении.

Кроме того, ^{252}Cf принадлежит к ядерным материалам, которые являются федеральной собственностью, стратегически значимы в проблеме ядерного нераспространения и, следовательно, требуют особых мер государственного учета, контроля и физической защиты.

Фотонейтронные источники

В этих источниках нейтроны получают по реакции (γ, n) , которая **может идти при энергиях γ -квантов, превышающих энергию связи нейтрона в ядре мишени.**

Мишени делятся на две группы:

- ❖ бериллиевые и дейтериевые мишени со сравнительно низкими порогами: 1,67 и 2,23 МэВ соответственно.
- ❖ мишени из элементов, для которых энергия связи нейтрона в ядре выше 6 МэВ.

Радиоактивные **изотопы**, как источники γ -излучения, **не испускают обычно γ -квантов с энергией, большей 3 МэВ**, поэтому в радиоактивных фотонейтронных источниках используются в **виде мишеней только бериллий и дейтерий.**

Фотонейтронные источники

В виде источников γ -квантов используются радиоактивные изотопы ^{24}Na , ^{56}Mn , ^{72}Ga , ^{88}Y , ^{116}La , ^{140}La , ^{228}Th в равновесии с основными дочерними продуктами распада. В этих источниках разброс нейтронов по энергиям бывает небольшой, поэтому для многих практических задач такие источники могут считаться моноэнергетическими.

Сечения образования нейтронов γ -квантами значительно меньше, чем α -частицами. Поэтому выход нейтронов по реакции (γ, n) обычно меньше, чем источников по реакции (α, n) .

Диапазон энергий нейтронов: 0,2 – 0,8 МэВ.

Основные характеристики бериллиевых и дейтериевых фотонейтронных

Источник	$T_{1/2}$	Энергия (Мэв) и выход γ -квантов на распад, на которых идет реакция	Энергия нейтронов, Мэв	Выход, $\times 10^4$ нейтрон/сек*
Na ²⁴ + Be	14,8 ч	3,862 (0,05%) 2,752 (100%)	0,83	13
Na ²⁴ + D ₂ O	14,8 ч	3,862 (0,05%) 2,752 (100%)	0,22	27
Mn ⁵⁶ + Be	2,576 ч	1,80 (24,9%) 2,1 (14,8%) 2,6 (0,1%) 2,9 (0,2%) 2,6 (0,1%) 2,9 (0,2%)	0,15; 0,30	2,9
Mn ⁵⁶ + D ₂ O	2,576 ч	1,80 (24,9%) 2,1 (14,8%) 2,6 (0,1%) 2,9 (0,2%)	0,22	0,31
Ga ⁷² + Be	14,2 ч	1,88 (8,2%) 2,20 (39,4%) 2,49 (11,2%) 2,51 (18,0%) 2,49 (11,2%) 2,51 (18,0%)	0,78**	5
Ga ⁷² + D ₂ O	14,2 ч	1,85 (99%) 2,80 (1,0%) 2,80 (1,0%)	0,13	6
Y ⁸⁸ + Be	104 дня	2,09 (25%) 1,69 (50%) 2,09 (6,5%) 2,52 (5,5%) 3,01 (0,2%) 2,52 (5,5%) 3,01 (0,2%)	0,16 0,31**	10
Y ⁸⁸ + D ₂ O	104 дня	2,09 (25%) 1,69 (50%) 2,09 (6,5%) 2,52 (5,5%) 3,01 (0,2%)	0,30	0,3
In ¹¹⁰ + Be	54 мин	1,76 (22%) 1,85 (2,3%) 2,20 (7,0%) 2,43 (2,5%) 2,43 (2,5%)	0,024	0,82
Sb ¹²⁴ + Be	60 дней	1,80; 2,62	0,62	19
La ¹⁴⁰ + Be	1,67 дня	1,76 (22%) 1,85 (2,3%) 2,20 (7,0%) 2,43 (2,5%) 2,43 (2,5%)	0,15 0,83 0,20	0,3
La ¹⁴⁰ + D ₂ O	1,67 дня	1,76 (22%) 1,85 (2,3%) 2,20 (7,0%) 2,43 (2,5%) 2,43 (2,5%)	0,15 0,83 0,20	0,8
MsTh + Be	6,7 года	1,76 (22%) 1,85 (2,3%) 2,20 (7,0%) 2,43 (2,5%) 2,43 (2,5%)	0,83	3,5
MsTh + D ₂ O	6,7 года	1,76 (22%) 1,85 (2,3%) 2,20 (7,0%) 2,43 (2,5%) 2,43 (2,5%)	0,20	9,5
Ra + Be***	1620 лет	1,76 (22%) 1,85 (2,3%) 2,20 (7,0%) 2,43 (2,5%) 2,43 (2,5%)	0,6 0,12	3,0 0,1

- * Выход нейтронов в сек на 1 г мишени на расстоянии 1 см от 1 кюри.
- ** Величина оценочная.
- *** Радий в равновесии с основными дочерними продуктами распада.

Генераторы нейтронов

Существуют источники нейтронов, использующие ускоренные заряженные частицы по реакциям (p,n) и (d,n) . Широкое распространение получили реакции ускоренных до 1 МэВ дейтронов с мишенью из тяжёлой воды для получения нейтронов с энергией 4 МэВ или ускоренных до 15 КэВ дейтронов с мишенью из трития для получения нейтронов с энергией 14.9 МэВ.

Генераторы нейтронов обычно выдают нейтроны со средней энергией 14 МэВ (по d-t реакции) и 2.5 МэВ (по d-d реакции).

Преимущества портативных нейтронных генераторов (НГ):

- они практически **не обладают радиационной опасностью в выключенном состоянии** при хранении, если не принимать во внимание некоторую наведенную активность конструктивных материалов генератора;
- наличие регулируемого режима излучения нейтронов **позволяет производить регистрацию полезных эффектов в интервалах между импульсами нейтронов**, что улучшает фоновые условия при измерениях.

Генераторы нейтронов

К недостаткам НГ относятся

- высокая **стоимость**;
- ограниченный **ресурс работы** (до 300 часов);
- **большие габариты** по сравнению с источником из ^{252}Cf (находящимся в рабочем состоянии, т.е. без защитного контейнера) ;
- **большая масса** (от 5 кг и выше);
- значительное **энергопотребление** (от 200 Вт и выше);
- **ограниченное время непрерывной работы** (требуется периодическое отключение для охлаждения мишени);
- **нестабильность выхода нейтронов** от импульса к импульсу (до 50 %).

Ядерный реактор как источник нейтронов деления

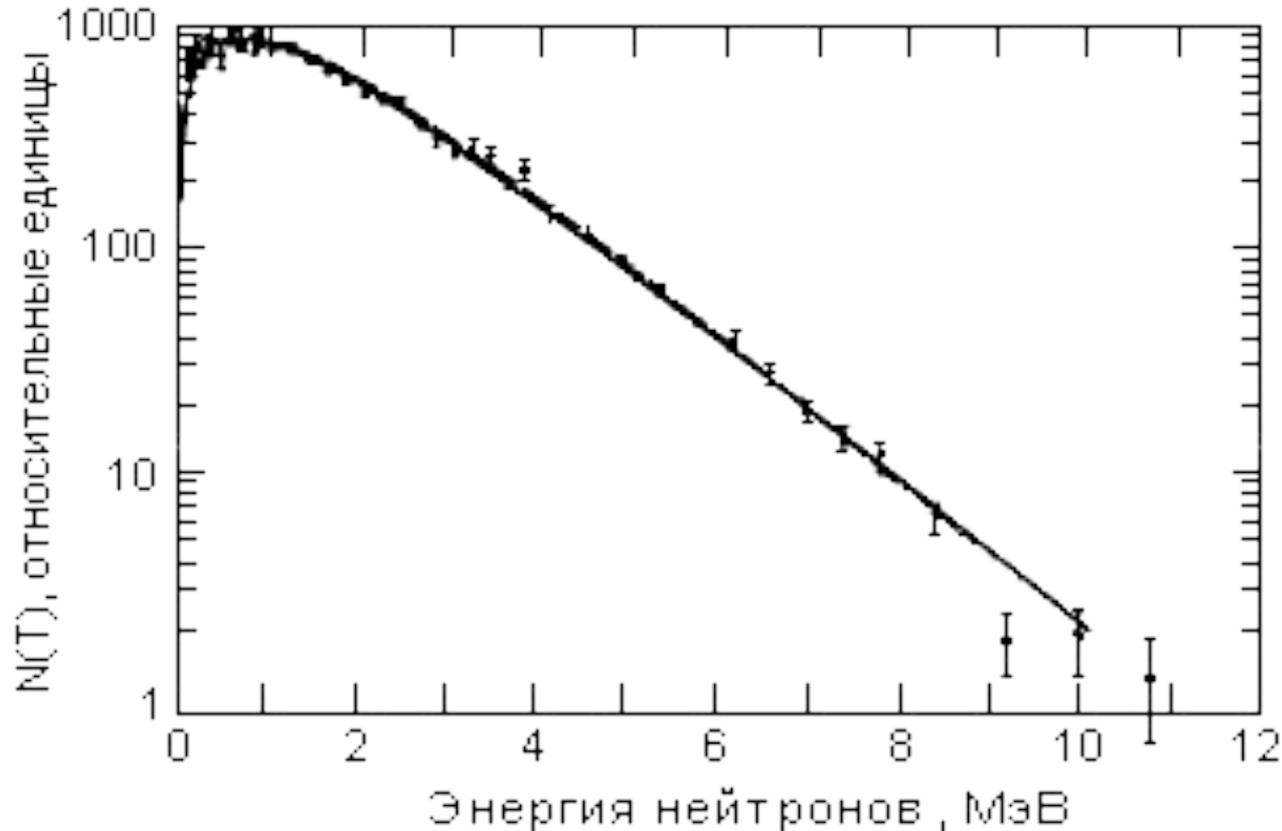
Реактор - устройство для осуществления управляемой цепной ядерной реакции с целью выработки тепловой энергии.

Ядерные реакторы, основанные на использовании энергии деления тяжелых ядер, являются мощными источниками гамма-излучения и нейтронов.

Нейтроны, сопровождающие процессы деления, могут быть разделены на

- мгновенные (>99%) и**
- запаздывающие.**

Энергетический спектр нейтронов, испущенных при делении тепловыми нейтронами ядра ^{235}U



Мгновенные нейтроны деления распределены по энергиям в широком интервале от нескольких десятков килоэлектронвольт до 18 МэВ. Они испускаются за время порядка нескольких микросекунд.

Оказалось, что **небольшая доля ($\approx 1\%$) нейтронов, испускающихся в процессе деления, появляется с некоторым запаздыванием относительно момента деления (так называемые запаздывающие нейтроны). Время запаздывания достигает 1 мин. Было установлено, что **запаздывающие нейтроны испускаются остановившимися осколками после предварительного β^- -распада.****

β^- -Распад осколков приводит к образованию дочерних ядер не только в основном, но и в возбужденных состояниях. **Если энергия возбуждения превышает энергию отделения нейтрона $B(n)$, то происходит испускание запаздывающих нейтронов.**

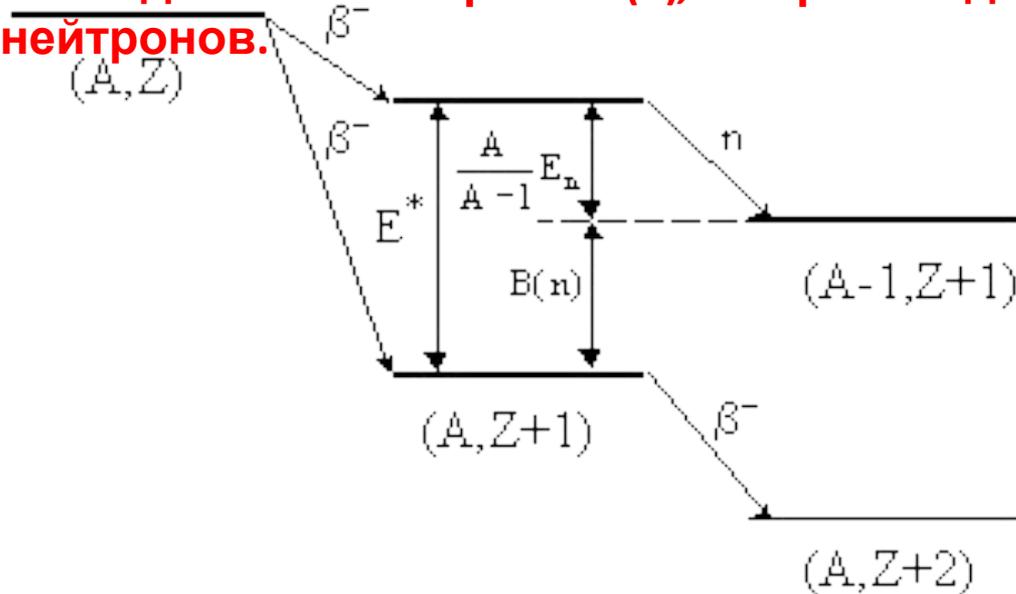


Схема образования запаздывающих нейтронов: E^* - энергия возбуждения ядра $(A, Z+1)$; $B(n)$ - энергия отделения нейтрона в ядре $(A, Z+1)$; E_n - кинетическая энергия запаздывающего нейтрона

Характеристики запаздывающих нейтронов деления.

Группа нейтронов	$T_{1/2}$ сек*	Средняя энергия, кэв	Доля запаздывающих нейтронов при делении**					
			Th ²³²	U ²³³	U ²³⁵	U ²³⁸	Pu ²³⁹	Pu ²⁴⁰
1	54,5	250	0,034	0,086	0,038	0,013	0,038	0,025
2	21,8	460	0,150	0,274	0,213	0,137	0,280	0,270
3	6,0	405	0,155	0,228	0,188	0,162	0,216	0,184
4	2,2	450	0,446	0,316	0,407	0,388	0,328	0,359
5	0,50	520	0,172	0,073	0,128	0,225	0,103	0,135
6	0,18		0,043	0,023	0,026	0,075	0,035	0,027
Общий выход	На деление		0,0496	0,0070	0,0165	0,0412	0,0063	0,0088
	На нейтрон, испускаемый при делении			0,0029	0,0067		0,0021	

* Приведенные периоды полураспада характерны для деления U²³⁵. Различие периодов для различных делящихся изотопов и энергий нейтронов для практических целей несущественно.

** Выходы для каждой группы представлены в виде доли запаздывающих нейтронов в данной группе от общего количества запаздывающих нейтронов.