



Кафедра медицинской и биологической физики

Тема: Рентгеновское излучение. Радиационная медицина

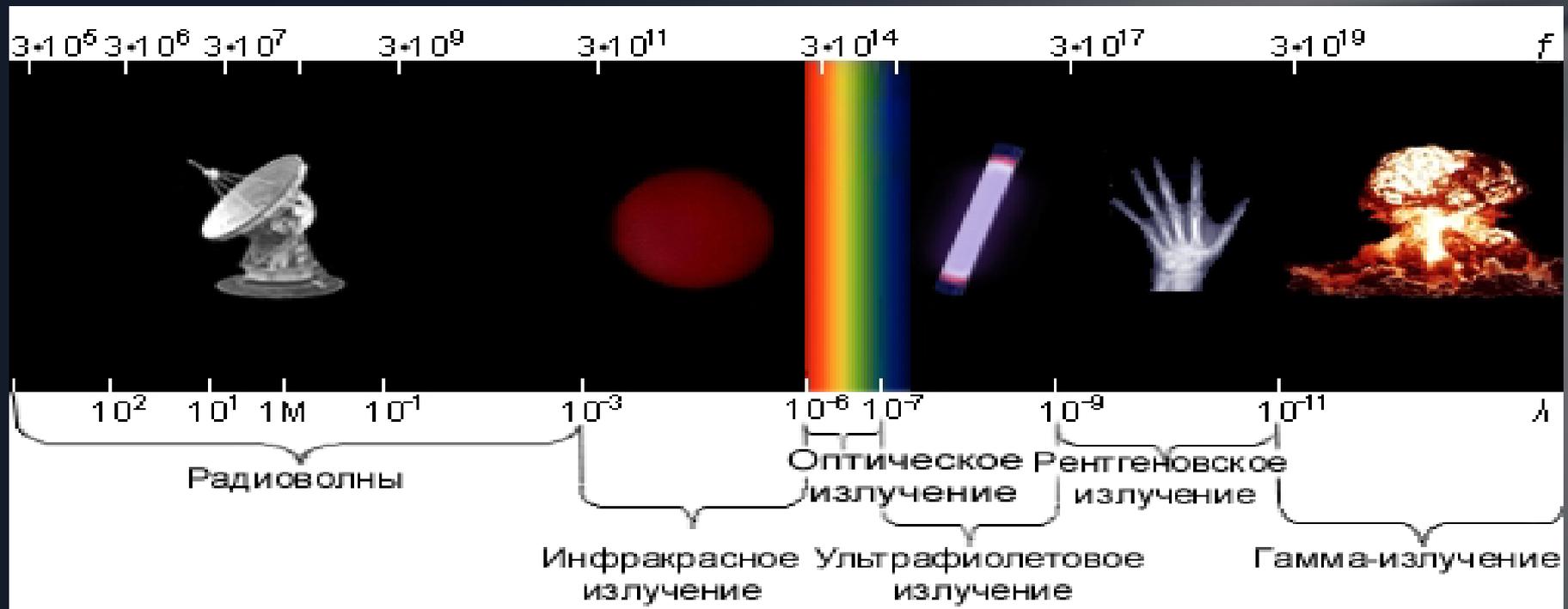
*лекция № 10
для студентов 1 курса, обучающихся по
специальности 31.05.03 - Стоматология*

Д.ф.-м.н., зав.каф., Салмин Владимир Валерьевич

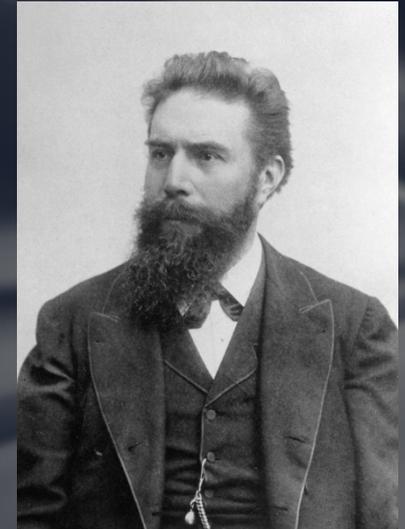
План лекции:

1. Виды рентгеновского излучения и способы его получения.
2. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом.
3. Применение рентгеновского излучения в медицине.
4. Радиоактивность.
5. Радиационная медицина

Рентгеновское излучение - электромагнитные волны с длиной от 80 до 10^{-5} нм.

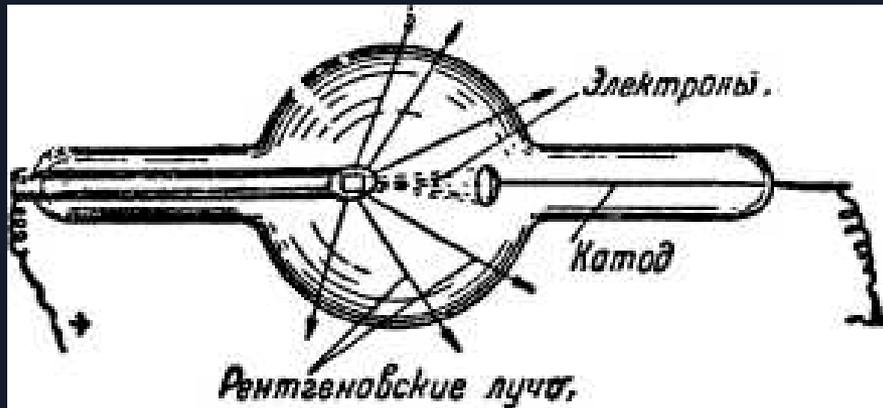


Первый в истории рентгеновский СНИМОК



Был сделан в 1895 г. Вильгельмом Кónрадом Рентгéном руки Альберта фон Кёлликера— швейцарский анатом, зоолог и гистолог, член-корреспондент Петербургской академии наук.

Рентгеновская трубка

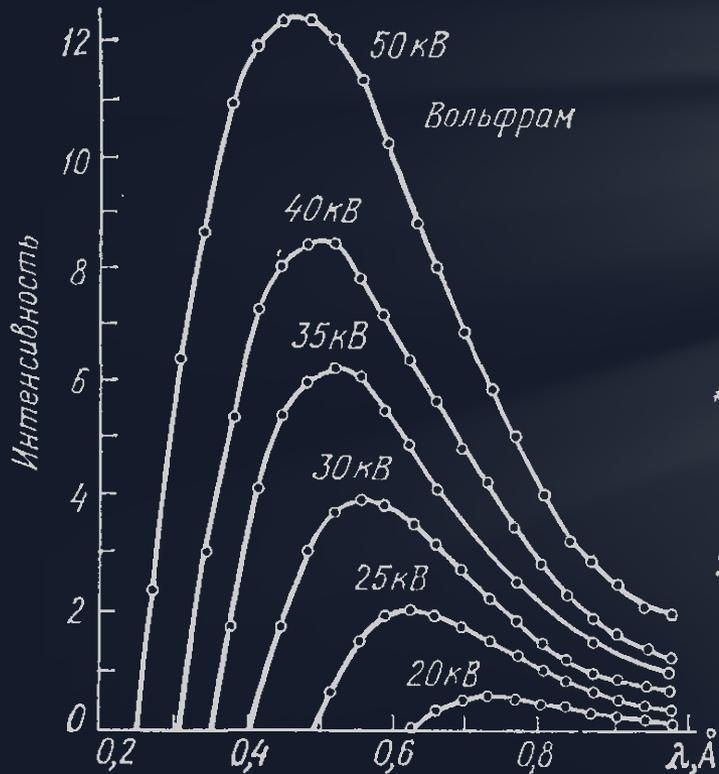


В рентгеновское излучение превращается примерно 5%, остальная энергия выделяется в виде тепла. Поэтому анод изготавливается из тугоплавкого материала

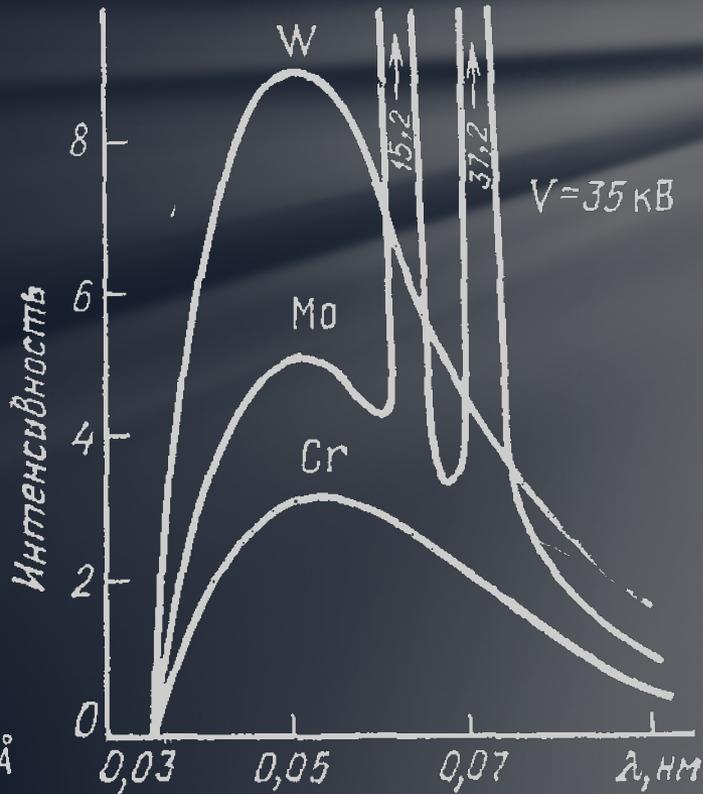


РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

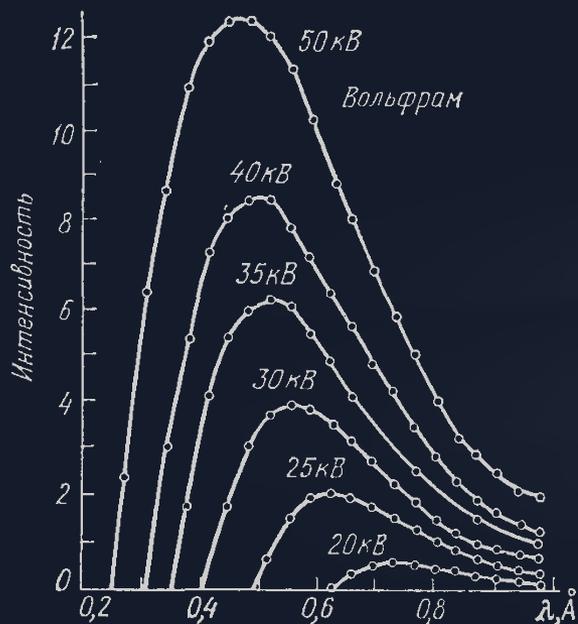
ТОРМОЗНОЕ



ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ



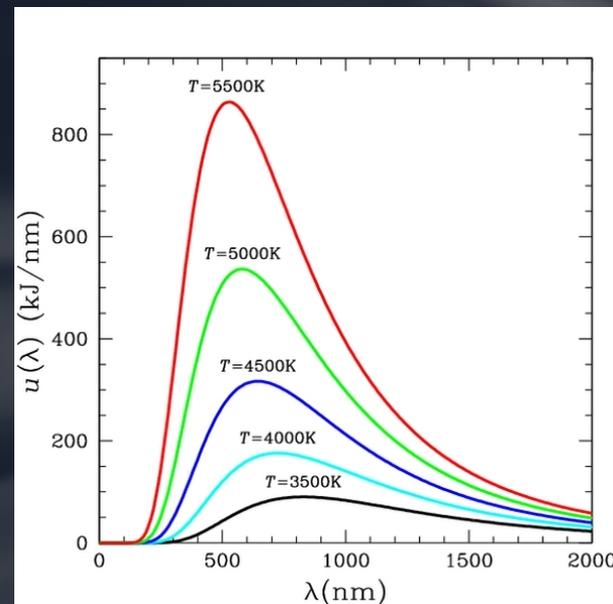
Спектр тормозного рентгеновского излучения



$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU};$$

h – постоянная Планка, c – скорость света,
 e – заряд электрона, U – напряжение.

$$\lambda_{\min} [\text{нм}] = \frac{1,239}{U[\text{кВ}]}$$



Закон ослабления рентгеновского излучения

$\Phi = \Phi_0 e^{-\mu x}$; μ – Линейный коэффициент ослабления

ЗАВИСИТ ОТ ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВА,

$\mu = \mu_m \rho$, μ_m – массовый коэффициент ослабления

$$\frac{\mu_{m \text{ кость}}}{\mu_{m \text{ вода}}} = 68!!!$$



Стоматологические рентгеновские аппараты



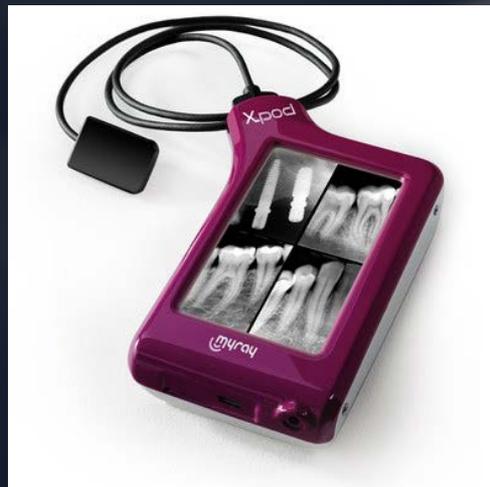
панорамный



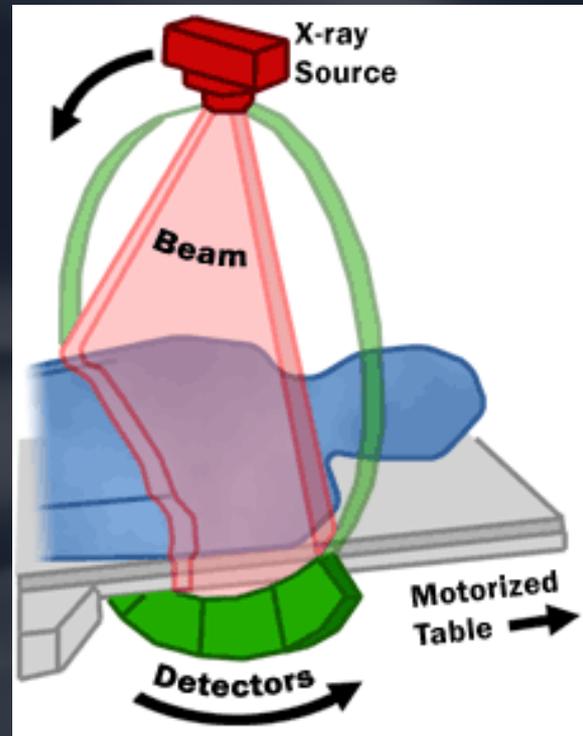
Цифровые сенсорные матрицы



Излучатели

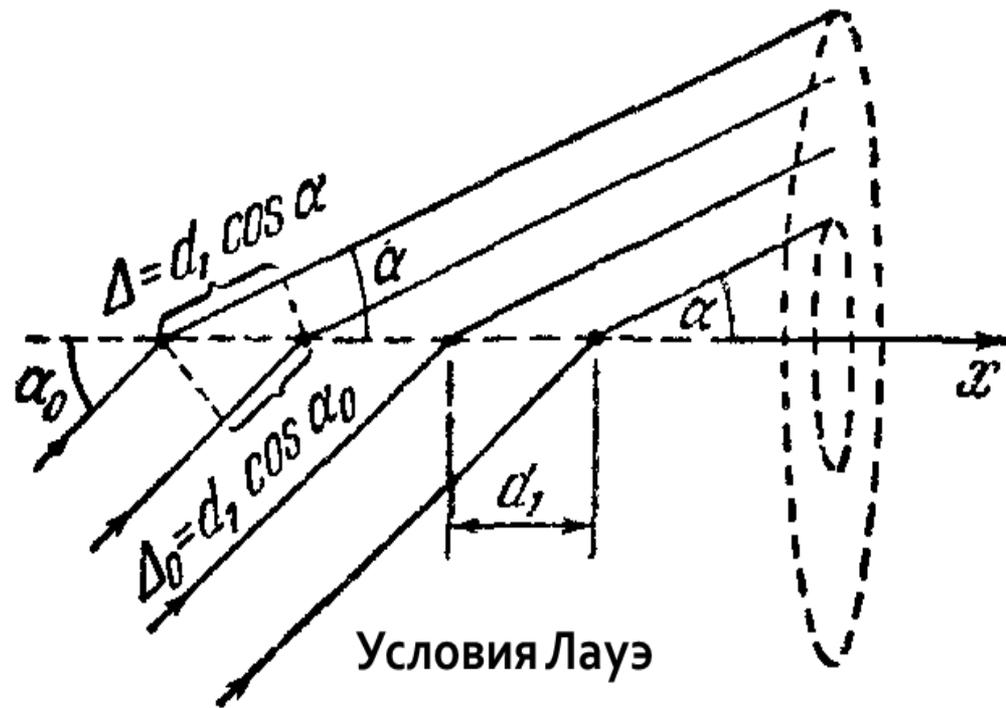
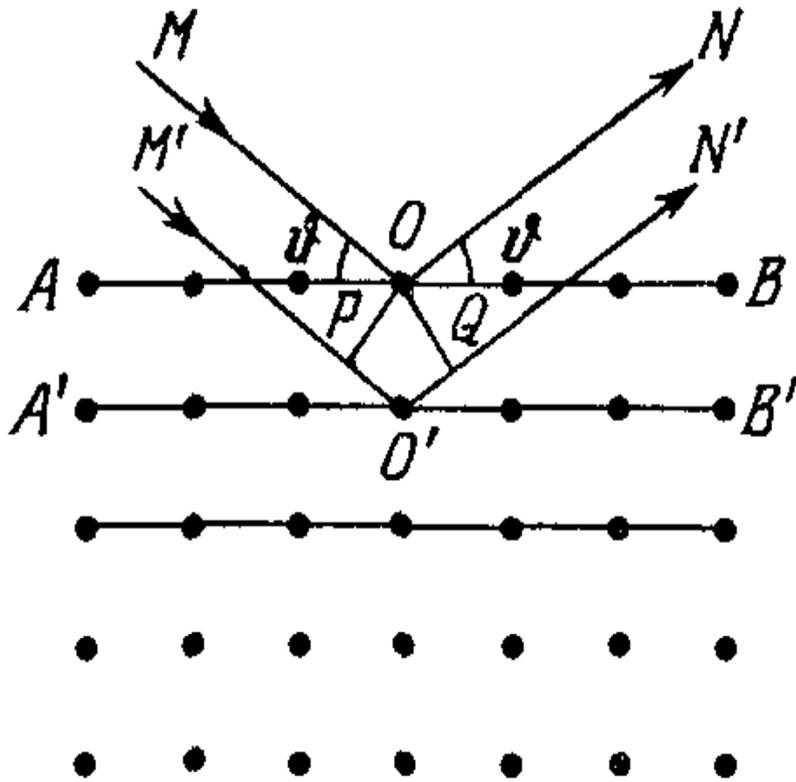


Конусно-лучевая компьютерная томография в стоматологии



Ортодонтическое лечение

Дифракция Вульфа-Брегга

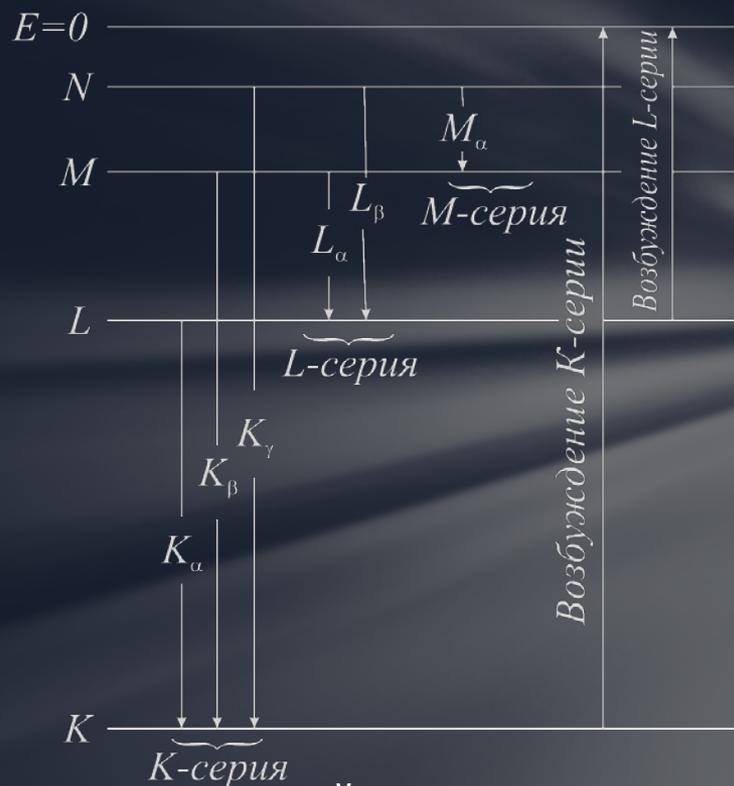
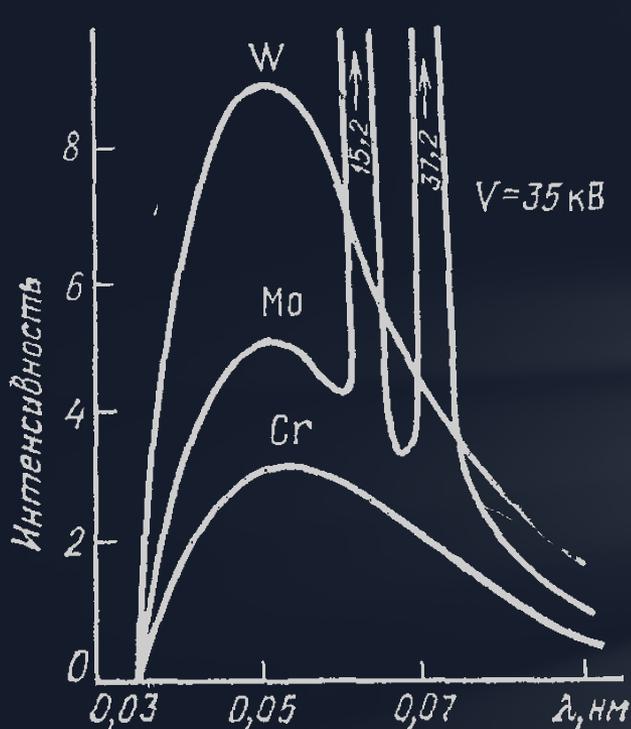


$$2d \sin \vartheta = \pm m\lambda \quad (m = 1, 2, \dots).$$

$$\left. \begin{aligned} d_1 (\cos \alpha - \cos \alpha_0) &= \pm m_1 \lambda, \\ d_2 (\cos \beta - \cos \beta_0) &= \pm m_2 \lambda, \quad (m_i = 0, 1, 2, \dots). \\ d_3 (\cos \gamma - \cos \gamma_0) &= \pm m_3 \lambda \end{aligned} \right\} \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1.$$

Стоматологическое материаловедение

Характеристическое рентгеновское излучение



При поглощении атомом порции энергии, достаточной для вырывания (или возбуждения) одного из внутренних электронов, испускается **характеристическое рентгеновское излучение**.

При достаточной энергии бомбардирующих электронов на фоне сплошного тормозного спектра появляются резкие линии характеристического спектра, причем интенсивность этих линий во много раз превосходит интенсивность фона.

Рентгеновские спектры возникают при переходах электронов во внутренних частях атомов, имеющих сходное строение для всех атомов, что подтверждает наличие в атоме энергетических слоев.

Закон Мозли

Мозли установил простой закон, связывающий частоты спектральных линий с атомным номером испускающего их элемента:

корень квадратный из частоты является линейной функцией атомного номера Z :

По измерениям Мозли, $\sigma = 1$ для K -серии и $\sigma = 7,5$ для L -серии. Константа C имеет значение, одинаковое для всех элементов. Последующие более точные измерения обнаружили некоторые отступления от простой линейной зависимости. Эти отступления для K - и L -серий не являются сколько-нибудь значительными, а становятся заметными лишь для M -, N - и O -серий. Мозли установил, что для линии K_α константа C имеет значение, определяемое Ry — постоянной Ридберга. Следовательно, для этой линии зависимость можно записать в виде*.

Линия такой же частоты получается при переходе электрона, находящегося в поле заряда $(Z-1)e$, с уровня $n = 2$ на уровень $n=1$. Для других линий формуле можно придать вид**. Однако эта формула не вполне точна. Она основана на допущении, что постоянная экранирования для обоих термов, входящих в выражение, имеет одинаковое значение.

На самом же деле экранирование, например, для K -терма будет слабее, чем для L -терма, потому что электрон, находящийся в L -оболочке, экранируют оба электрона K -оболочки и, кроме того, частичное участие в экранировании принимают остальные электроны L -оболочки, в то время как для электрона L -оболочки экранирование осуществляется только одним вторым K -электроном. С учетом сделанных замечаний, уточненная формула имеет вид***

$$\sqrt{\omega} = C(Z - \sigma)$$

$$C_{K\alpha} = \sqrt{\frac{3}{4} Ry}$$

$$*\omega = R(Z-1)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right)$$

$$**\omega = R(Z-\sigma)^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

$$***\omega = R \left[\frac{(Z-\sigma_1)^2}{n_1^2} - \frac{(Z-\sigma_2)^2}{n_2^2} \right]$$

Стоматологическое материаловедение – Рентгенофлуоресцентный анализ



Определение золота, платины, серебра и палладия в стоматологических сплавах неразрушающим методом.

Сканирующий микрорентгенофлуоресцентный анализ В СТОМАТОЛОГИИ

Review Article

Applications of X-ray fluorescence analysis (XRF) to dental and medical specimens

Motohiro Uo^{a,*}, Takahiro Wada^a, Tomoko Sugiyama^b

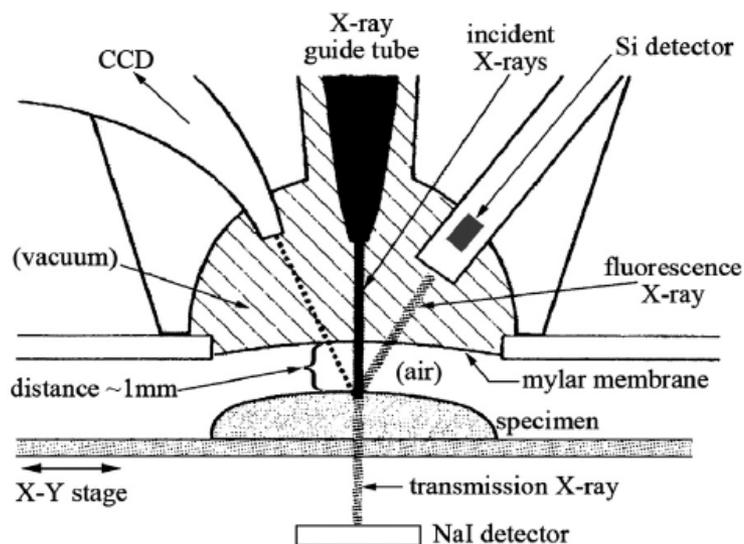
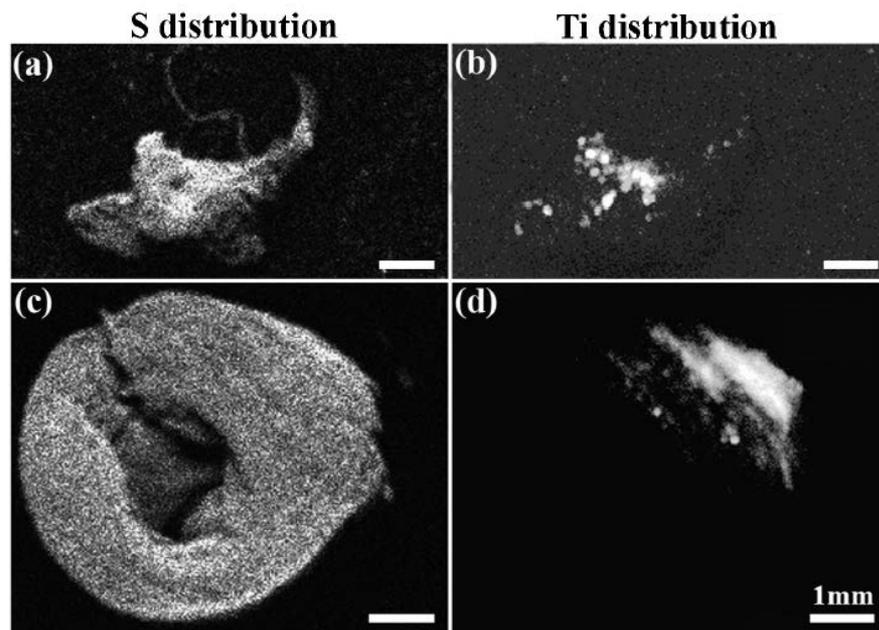


Figure 2 A schematic diagram of micro-focused XRF equipment.



S and Ti distribution images from oral mucosa in contact with a pure titanium cover screw of a dental



Ионизирующее излучение

Ионизирующим излучением называют потоки частиц и электромагнитных квантов, взаимодействие которых со средой приводит к ионизации ее атомов и молекул.

Ионизирующее излучение

$$E > I \approx 10 \text{ эВ}$$

ВУФ (200-80 нм),
Рентгеновское излучение (80-
10-5 нм)

γ -излучение

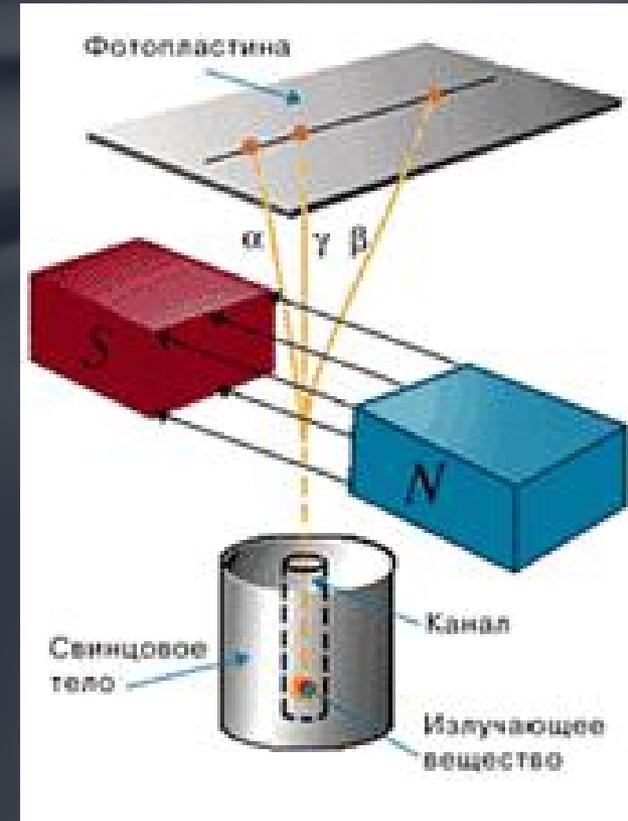
α -излучение

β -излучение

Нейтроны

Протоны

Пучки ионов



Размер ядра



$$r_{min} = \frac{2Ze^2}{\epsilon}$$

Метод Резерфорда – по электромагнитному взаимодействию
Второй метод оценка ядерного взаимодействия

Если ядро считать сферическим, то все методы определения его радиуса приводят к формуле

$$r = r_0 A^{1/3} \quad r_0 = (1,2 - 1,5) 10^{-13} \text{ см}$$

размер 10^{-13} см – ферми

сечение 10^{-24} см² – барн

Радиоактивность

Радиоактивностью называют самопроизвольный распад неустойчивых ядер с испусканием других ядер или элементарных частиц.

Характерным признаком, отличающим ее от других видов ядерных превращений, является самопроизвольность (спонтанность) этого процесса

Естественная радиоактивность встречается у неустойчивых ядер, существующих в природных условиях.

Искусственной называют радиоактивность ядер, образованных в результате различных ядерных реакций. Принципиального различия между естественной и искусственной радиоактивностями нет. Им присущи общие закономерности

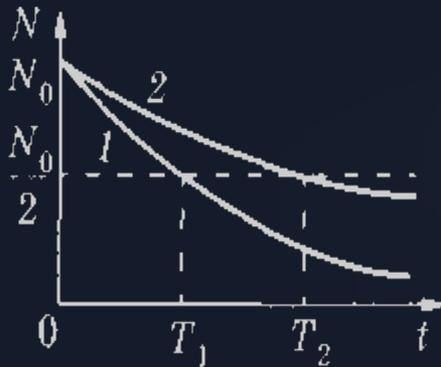
Закон радиоактивного распада

Закон радиоактивного распада — физический закон, описывающий зависимость интенсивности радиоактивного распада от времени и количества радиоактивных атомов в образце. Открыт Фредериком Содди и Эрнестом Резерфордом,

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N,$$

Дифференциальная форма - λ — постоянная распада, которая характеризует вероятность радиоактивного распада за единицу времени и имеющая размерность с^{-1} . N_0 — начальное число атомов, то есть число атомов. Таким образом, число радиоактивных атомов уменьшается со временем по экспоненциальному закону.

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$



$$I(t) = -\frac{d}{dt}(N_0 e^{-\lambda t}) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = I_0 e^{-\lambda t},$$

Скорость распада — число распадов в 1 с — **беккерель** (Бк).
Внесистемная единица - **кюри** (Ки,). Один кюри соответствует числу распадов в секунду в 1 грамме радия. $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$.

Среднее время жизни – период полураспада

Из закона радиоактивного распада можно получить выражение для **среднего времени жизни радиоактивного атома**.

$$\tau = -\frac{1}{N_0} \int_{N_0}^0 t dN = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}.$$

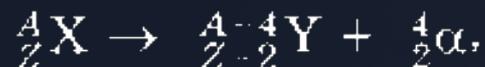
На практике получила большее распространение другая временная характеристика — **период полураспада** равная времени, в течение которого число радиоактивных атомов или активность образца уменьшаются в 2 раза

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2 \approx 0,693\tau.$$

α -распад

Альфа-распад состоит в самопроизвольном превращении одного ядра в другое ядро с испусканием α -частицы (ядра атома гелия ${}^4_2\text{He}$).

Схему альфа-распада с учетом правила смещения (закона сохранения зарядового и массового чисел) записывают в виде



где X и Y — символы соответственно материнского и дочернего ядер. Примером α -распада является превращение радона в полоний, а полония в свинец:



Суммарная масса дочернего ядра и α -частицы меньше массы материнского ядра, то же можно сказать относительно их энергий покоя. Разность этих энергий равна кинетической энергии α -частицы и дочернего ядра.

При α -распаде дочернее ядро может образоваться не только в нормальном, но и в возбужденных состояниях. Так как они принимают дискретные значения, то и значения энергии α -частиц, вылетающих из разных ядер одного и того же радиоактивного вещества, дискретны. Энергия возбуждения дочернего ядра чаще всего выделяется в виде γ -фотонов. **Именно поэтому α -распад сопровождается γ -излучением.**

β-распад

Бета-распад есть самопроизвольный процесс, в котором нестабильное ядро A_ZX превращается в ядро - изобар ${}^A_{Z+1}X$ или ${}^A_{Z-1}X$. Конечным результатом этого процесса является превращение в ядре $n \rightarrow p$ нейтрона в протон или $p \rightarrow n$ протона в нейтрон

1) электронный β⁻-распад, в котором ядро испускает электрон, а потому зарядовое число Z увеличивается на единицу;



2) позитронный β⁺-распад, в котором ядро испускает позитрон и по этой причине его зарядовое число уменьшается на единицу;

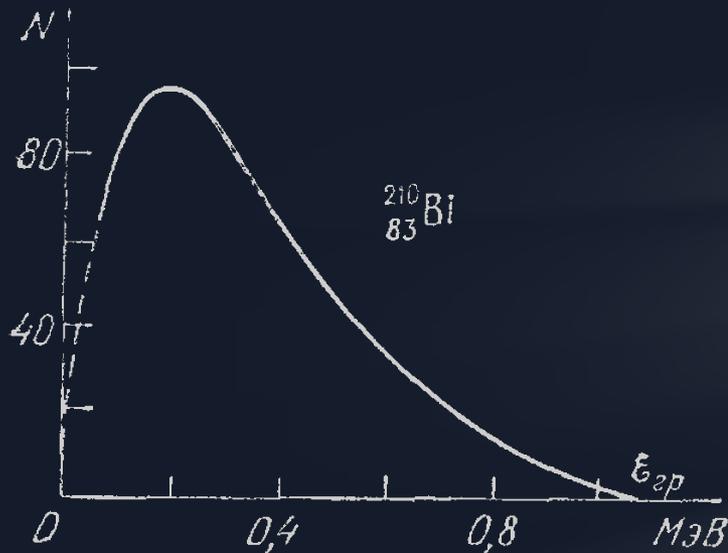


3) электронный захват (e-захват), в котором ядро поглощает один из электронов электронной оболочки, а потому зарядовое число уменьшается на единицу. Обычно электрон поглощается из K-слоя атома, поскольку этот слой ближе всего находится от ядра. В этом случае e-захват называют также K-захватом.



Нейтрино

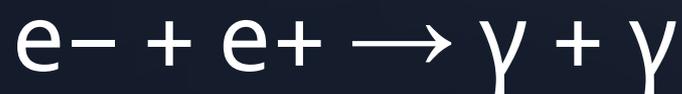
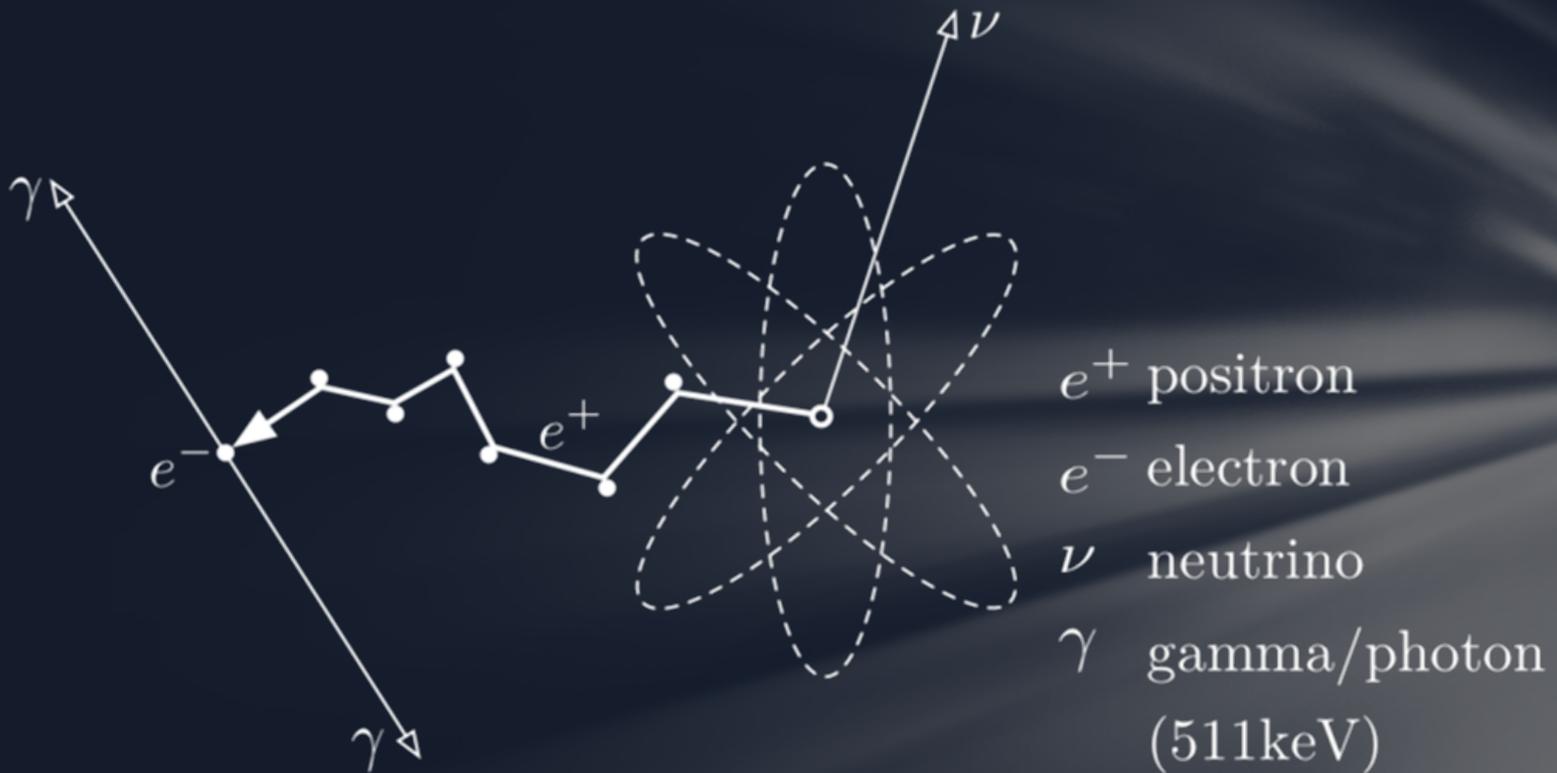
Радиоактивные атомы одного и того же сорта испускают электроны самых различных энергий, начиная от нуля и кончая некоторым предельным значением, характерным для рассматриваемого β -излучателя. Это предельное значение называется верхней границей β -спектра.



электронное
нейтрино/электронное
антинейтрино;
мюонное нейтрино/мюонное
антинейтрино
тау-нейтрино/анти-тау-нейтрино

Для устранения кажущегося нарушения закона сохранения энергии в бета-распаде была предложена гипотеза о существовании нейтрино Вольфгангом Паули в письме участникам физической конференции в Тюбингене в 1930 году. Нейтрино было экспериментально обнаружено в 1956 году командой под руководством Клайда Коуэна и Фредерика Райнеса

Аннигиляция



$$E = 2E_0 = 2mc^2$$

Позитронно-эмиссионная томография

Позитронно-эмиссионная томография (позитронная эмиссионная томография, сокращ. ПЭТ), она же двухфотонная эмиссионная томография — радионуклидный томографический метод исследования внутренних органов человека или животного. Метод основан на регистрации пары **гамма-квантов, возникающих при аннигиляции позитронов с электронами**. Позитроны возникают при позитронном бета-распаде радионуклида, входящего в состав радиофармпрепарата, который вводится в организм перед исследованием.

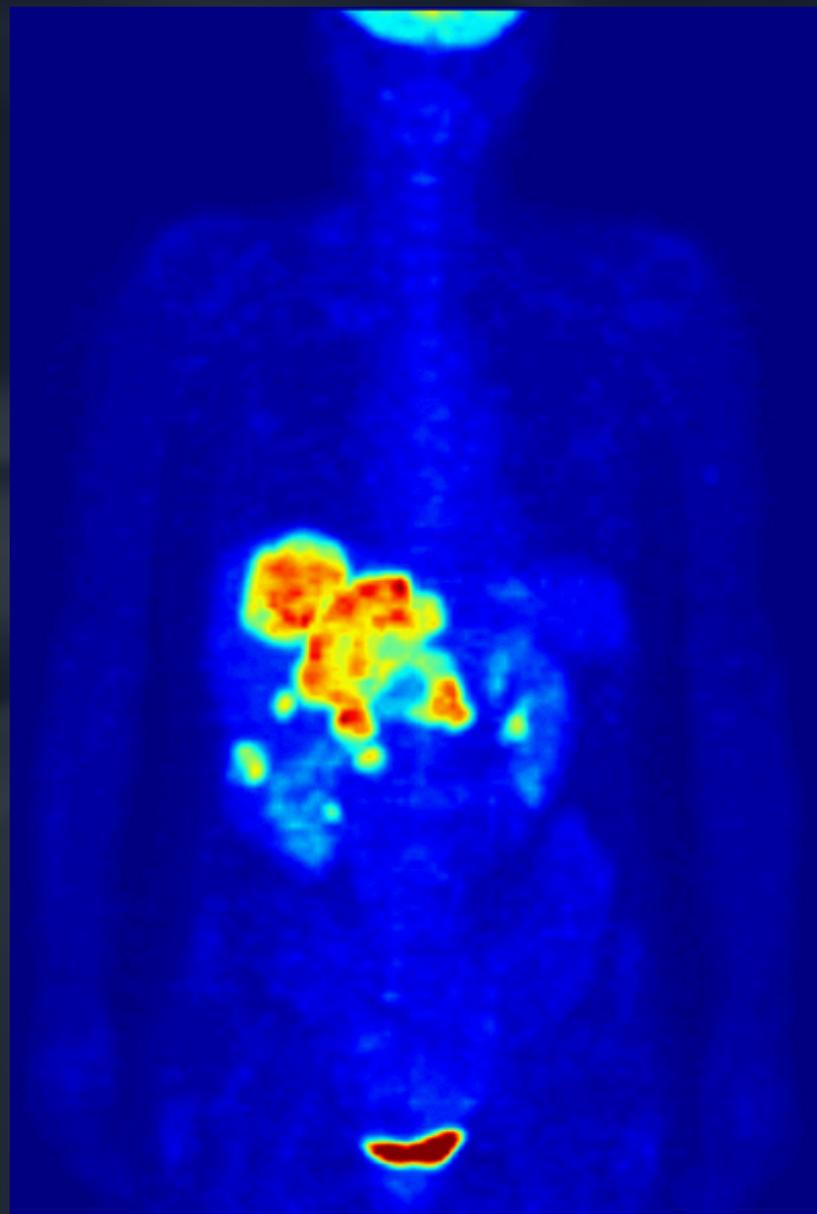
На сегодняшний день в ПЭТ в основном применяются позитрон-излучающие изотопы элементов второго периода периодической системы:

углерод-11 ($T_{1/2} = 20,4$ мин.)

азот-13 ($T_{1/2} = 9,96$ мин.)

кислород-15 ($T_{1/2} = 2,03$ мин.)

фтор-18 ($T_{1/2} = 109,8$ мин.)



Ядерная медицина - диагностика

Раздел клинической медицины, который занимается применением **радионуклидных фармацевтических препаратов** в диагностике и лечении

Диагностика

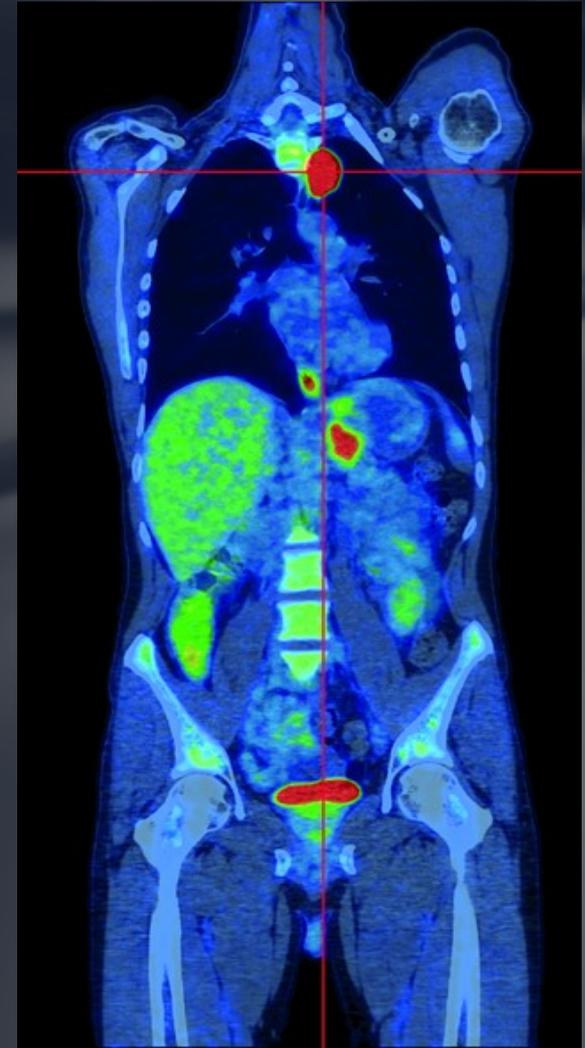
In vitro - образцы тканей и помещаются в пробирку, где взаимодействуют с радиоактивными изотопами — метод называется **радиоиммунным анализом**

In vivo производится инъекция радиофармпрепаратов внутрь человеческого организма, а измерительные приборы фиксируют излучение (эмиссионная томография). В качестве изотопов используются гамма-излучатели и позитронные излучатели.

Изотопы производятся в ядерных реакторах и на циклотронах, затем синтезируются с биологическими маркерами в готовые радиофармпрепараты

Гамма-излучение в диагностике *in vivo* улавливается гамма-камерами, метод называется **сцинтиграфией**.

Первоначально **использовалась планарная сцинтиграфия**, дающая плоскостную проекцию, сейчас набирает популярность **одnofотонная эмиссионная компьютерная томография (SPECT)**, работающая уже с трёхмерными моделями. Позитронное излучение фиксируют **позитронно-эмиссионная томографы (ПЭТ-сканеры)**

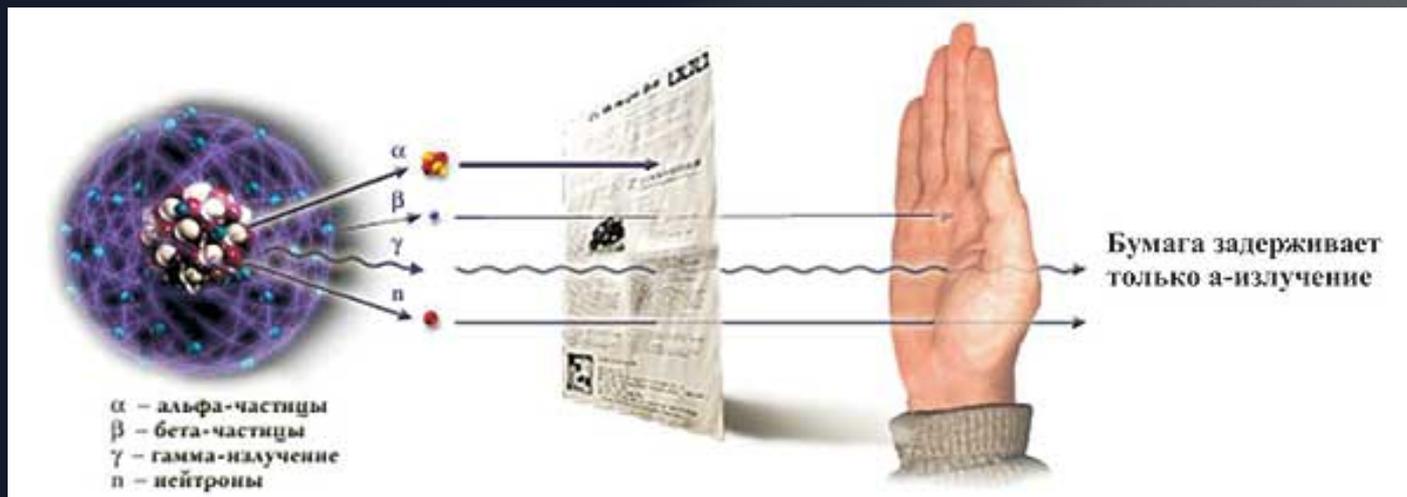


Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом

Основным механизмом потерь энергии заряженной частицы при прохождении через вещество является **ионизационное торможение**. При этом ее кинетическая энергия расходуется на возбуждение и ионизацию атомов среды.

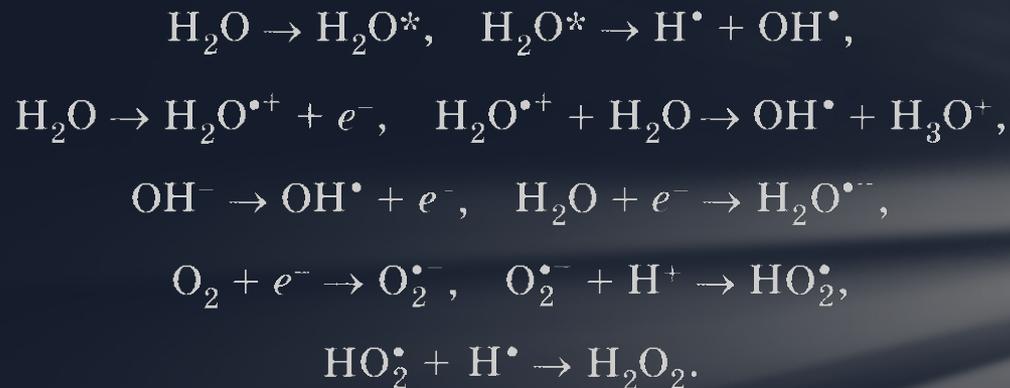
Под **линейной плотностью ионизации** i понимают отношение числа dn ионов одного знака, образованных заряженной ионизирующей частицей на элементарном пути dl , к этому пути: $i = dn/dl$.

Линейной тормозной способностью вещества S называют отношение энергии dE , теряемой заряженной ионизирующей частицей при прохождении элементарного пути dl в веществе, к длине этого пути: $S = E/dl$.

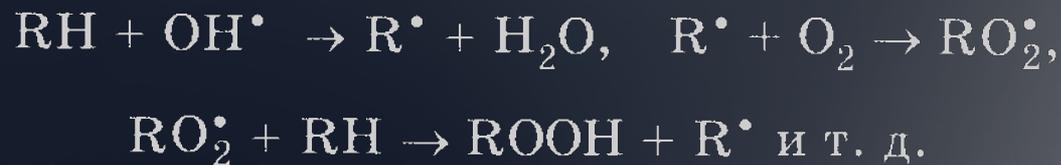


Физические основы действия ионизирующих излучений на организм

Под действием ионизирующих излучений происходят химические превращения вещества, получившие название **радиолиза**. Укажем возможные механизмы радиолиза воды:



Наиболее реакционноспособными являются три типа **радикалов** (присутствие неспаренного электрона у свободных радикалов обозначается жирной точкой в верхнем правом индексе), образующихся при радиолизе воды: e^- , H^\bullet и OH^\bullet . Взаимодействие органических молекул RH с этими радикалами может привести к образованию **радикалов органических молекул**, например



Дозиметрия ионизирующего излучения

Независимо от природы ионизирующего излучения его взаимодействие количественно может быть оценено отношением энергии, переданной элементу облученного вещества, к массе этого элемента. Эту характеристику называют **дозой излучения (поглощенной дозой излучения) D** . Единицей поглощенной дозы излучения является **грей (Гр)**, который соответствует дозе излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж. Внесистемная единица дозы излучения — **рад** ($1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр} = 100 \text{ эрг/г}$), (*Radiation Absorbed Dose.*)

Дозу, отнесенную ко времени, называют **мощностью дозы. Мощность дозы излучения** выражается в **греях в секунду (Гр/с)**. Внесистемная единица мощности — **рад в секунду (рад/с)**.

Можно оценить поглощенную телом дозу по ионизирующему действию излучения в воздухе. За единицу экспозиционной дозы принят **кулон на килограмм (Кл/кг)**. На практике используют единицу, называемую **рентгеном (Р)**, — экспозиционная доза рентгеновского или γ -излучения, при которой в результате полной ионизации в 1 см³ сухого воздуха (0,001293 г) при 0 °С и 760 мм рт. ст. образуется $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов. $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^4 \text{ Кл/кг}$.

Количественная оценка биологического действия ионизирующего излучения. Эквивалентная доза

Для данного вида излучения биологическое действие обычно тем больше, чем больше доза излучения. Однако различные излучения даже при одной и той же поглощенной дозе оказывают разные воздействия. В дозиметрии принято сравнивать биологические эффекты различных излучений с соответствующими эффектами, вызванными рентгеновским и γ -излучениями. Коэффициент K , показывающий, во сколько раз эффективность биологического действия данного вида излучения больше, чем рентгеновского или γ -излучения, при одинаковой дозе излучения в тканях, называется **коэффициентом качества**. В радио-биологии его называют также **относительной биологической эффективностью (ОБЭ)**.

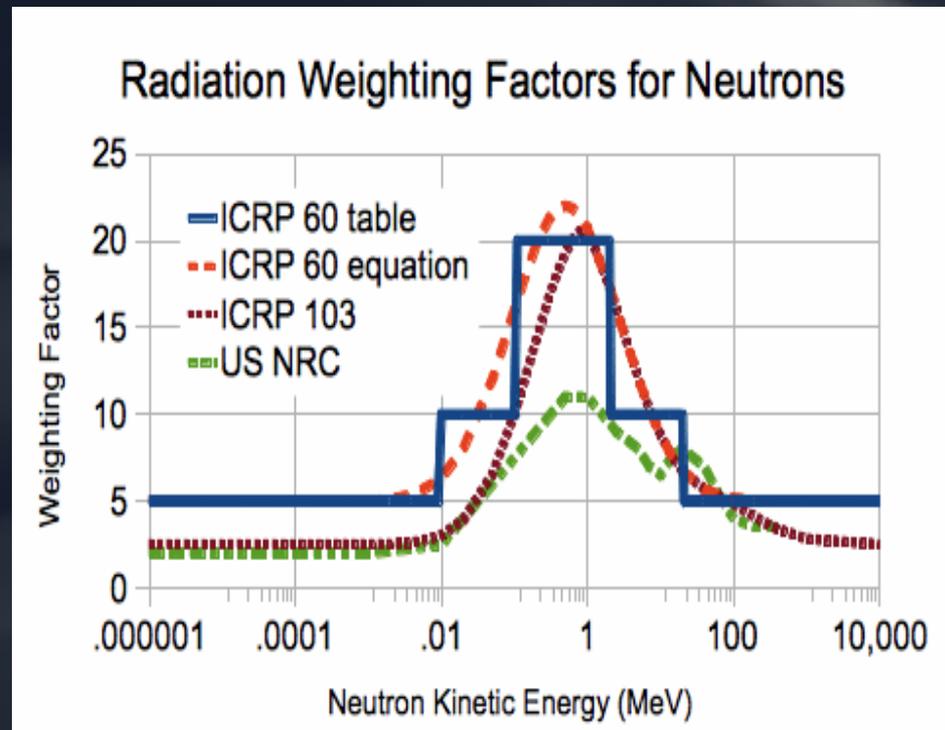
Так как K — безразмерный коэффициент, то эквивалентная доза излучения имеет ту же размерность, что и поглощенная доза излучения, но называется **зивертом (Зв)**. внесистемная единица эквивалентной дозы — **бэр**, $1 \text{ бэр} = 10^{-2} \text{ Зв}$. (*Бэр* — аббревиатура слов «биологический эквивалент рентгена»)

Эквивалентная доза в бэрах равна дозе излучения в радах, умноженной на коэффициент качества.

Относительная биологическая эффективность различных видов ионизирующего излучения

according to ICRP report 92[1]

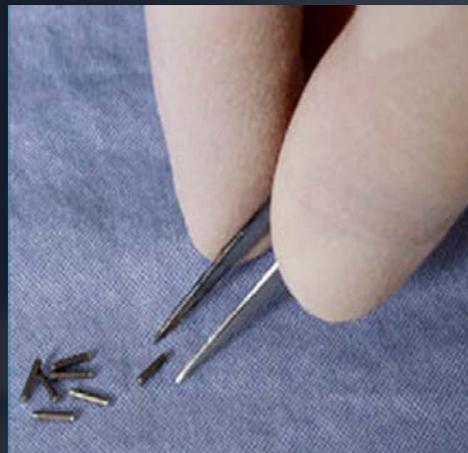
Radiation	Energy	w_R (also Q)
x-rays, gamma rays, beta rays, muons		1
neutrons	< 10 keV	5
	10 keV - 100 keV	10
	100 keV - 2 MeV	20
	2 MeV - 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
protons, charged pions	> 2 MeV	2
alpha particles, nuclear fission products, heavy nuclei		20



Ядерная медицина - терапия

Брахитерапия - контактная терапия (французы предпочитают термин **кюритерапия**). Она подразумевает доставку к поражённому органу внутри человеческого тела радиофармпрепарата — микроисточника радиации, который уничтожает или изолирует больные клетки. Главным используемым для лечения изотопом является сейчас ^{131}I (**радиойодтерапия**), источник гамма-лучей и электронов.

Лучевая терапия - лечение ионизирующей радиацией (рентгеновским, гамма-излучением - **гамма-нож**, нейтронным излучением - **нейтрон-захватная** терапия, бета-излучением пучками протонов из медицинского ускорителя - протонная терапия). Применяется в основном для лечения злокачественных опухолей.



Заключение:

В лекции рассмотрены:

виды рентгеновского излучения и способы его получения

понятие радиоактивности, виды радиоактивности;

дозиметрия ионизирующего излучения

способы защиты от проникающей радиации

Тест-контроль

Рентгеновское излучение – это:

1. электромагнитная волна
2. поток электронов
3. поток протонов

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Обязательная:

Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика: учебник. -М.: Дрофа, 2007.-

Дополнительная:

Федорова В.Н. Краткий курс медицинской и биологической физики с элементами реабилитологии: учебное пособие. -М.: Физматлит, 2005.-

Антонов В.Ф. Физика и биофизика. Курс лекций: учебное пособие.-М.: ГЭОТАР-Медиа, 2006.-

Богомолов В.М. Общая физиотерапия: учебник. -М.: Медицина, 2003.-

Самойлов В.О. Медицинская биофизика: учебник. -СПб.: Спецлит, 2004.-

Руководство к лабораторным работам по медицинской и биологической физике для самост. работы студентов /сост. О.Д. Барцева и др. Красноярск: Литера-принт, 2009.-

Сборник задач по медицинской и биологической физике: учебное пособие для самост. работы студентов / сост. О.П.Квашнина и др. -Красноярск: тип.КрасГМА, 2007.-

Электронные ресурсы:

ЭБС КрасГМУ

Ресурсы интернет

Электронная медицинская библиотека. Т.4. Физика и биофизика.- М.: Русский врач, 2004.



Красноярский
Государственный
Медицинский
Университет
им. проф.
В.Ф.Войно-Ясенецкого



**БЛАГОДАРЮ
ЗА ВНИМАНИЕ**