

# Лекция 15

- Рентгеновское излучение, радиоактивность
- Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом
- Дозиметрия ионизирующего излучения

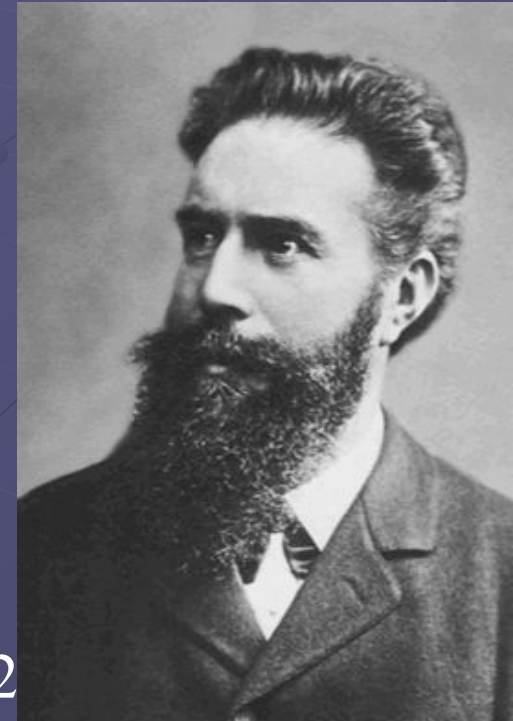
**Лектор: к.т.н., доцент Якимов А.Н.**

Кафедра медицинской и биологической физики, медицинской информатики, биостатистики

**ГУ «Луганский государственный медицинский университет»**

# ВВЕДЕНИЕ

- Применение рентгеновских лучей широко и разнообразно. В медицине рентгеновские лучи применяются и для диагностики, и для лечения заболеваний. Также находят применение в физике, химии, биологии, технике, криминалистике и искусствоведении.
- Открытие рентгеновских лучей датируется 8 ноября 1895. В этот день Вильгельм Конрад Рентген (1845-1923) сделал открытие, которое всемирную славу.
- Он обнаружил невидимое излучение, беспрепятственно проходящее через и другие материалы.
- Значение этого открытия подтверждено январе 1896, когда в честь ученого было недавно обнаруженное излучение.



# РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

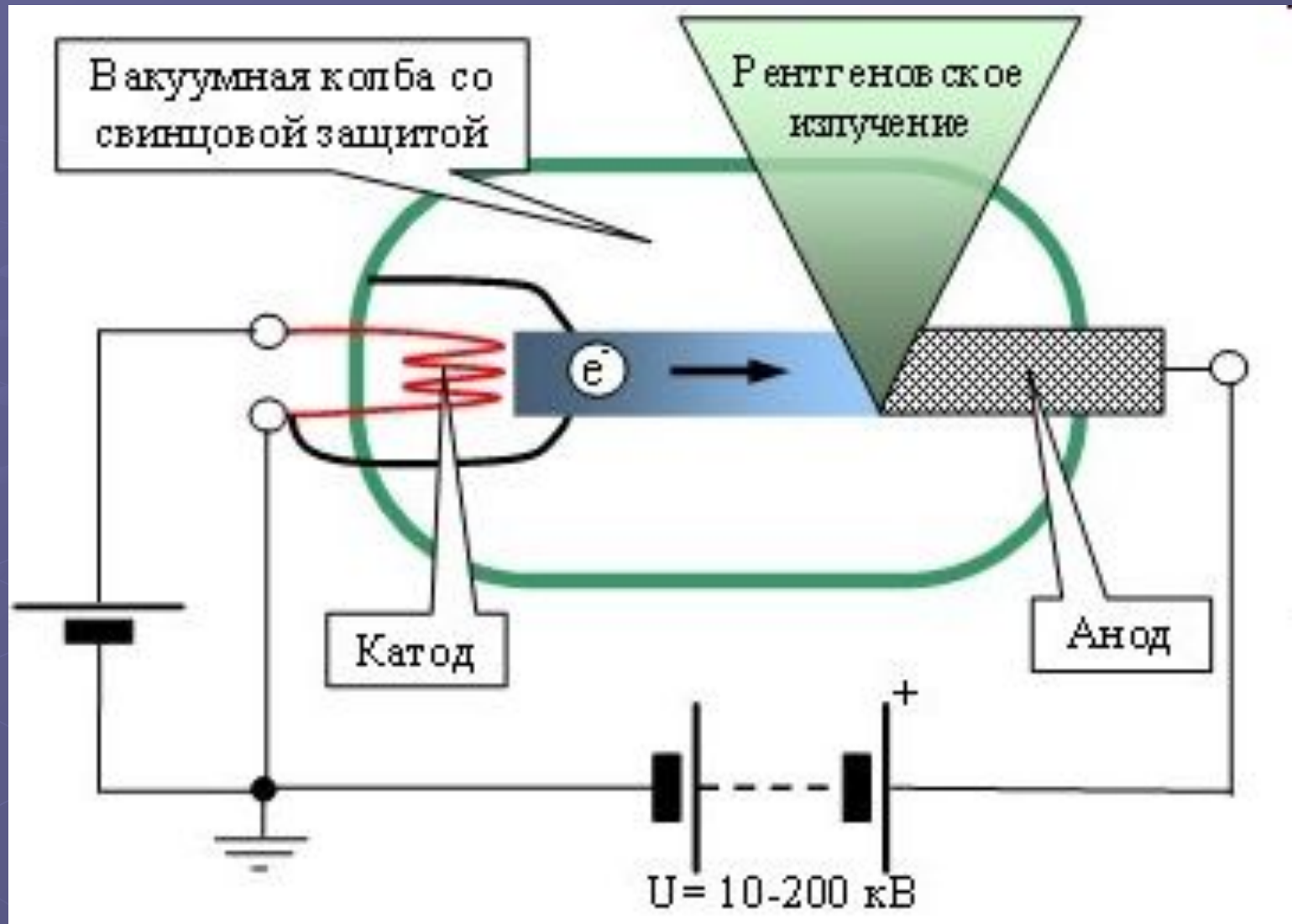
- **Рентгеновское излучение** - это электромагнитные волны с длиной от  $10^{-5}$  до 80 нм. Возникает при взаимодействии электронов, движущихся с большими скоростями, с веществом. Когда электроны соударяются с атомами какого-либо вещества, они быстро теряют свою кинетическую энергию, большая ее часть переходит в тепло, а меньшая (1%), преобразуется в энергию рентгеновского излучения, она высвобождается в форме квантов. Рентгеновские фотоны различаются своей энергией, обратно пропорциональной их длине волны. При обычном способе получения рентгеновского излучения получают широкий диапазон длин волн, который называют **рентгеновским спектром**. В спектре присутствуют ярко выраженные компоненты.
- Рентгеновское излучение получают в **рентгеновских трубках**.  $eU = h\nu$  - закон сохранения энергии для рентгеновского излучения.  $h\nu$  - энергия рентгеновского излучения ( $h$  - постоянная планка,  $\nu$  - частота),  $eU$  - энергия электрона,  $e$  - заряд электрона,  $U$  - электрическое напряжение на трубке.

# РЕНТГЕНОВСКАЯ ТРУБКА

Рентгеновская трубка представляет собой вакуумную колбу, в которой помещаются электроды: катод и анод. Электроны из разогретого катода и под действием разности потенциалов между анодом и катодом, соответствующей анодному напряжению, попадают на анод. Энергия таких электронов одинакова, численно равна величине анодного напряжения и выражается в электрон-вольтах. Например, если анодное напряжение равно 70 кВ (киловольт), то все электроны, попадающие на анод будут иметь энергию  $E = eU = 70 \text{ кэВ}$  (килоэлектрон-вольт). В результате торможения электронов в металле анода происходит генерация рентгеновских квантов с энергией от 0 до 70 кэВ. Распределение квантов по энергии (**спектр излучения**) зависит от анодного напряжения и от материала анода

Различают диагностические, терапевтические, дефектоскопические трубки, а также для рентгеновского анализа. По способу получения свободных электронов различают ионные и электронные рентгеновские трубки.

# РЕНТГЕНОВСКАЯ ТРУБКА



# РЕНТГЕНОВСКИЕ АППАРАТЫ

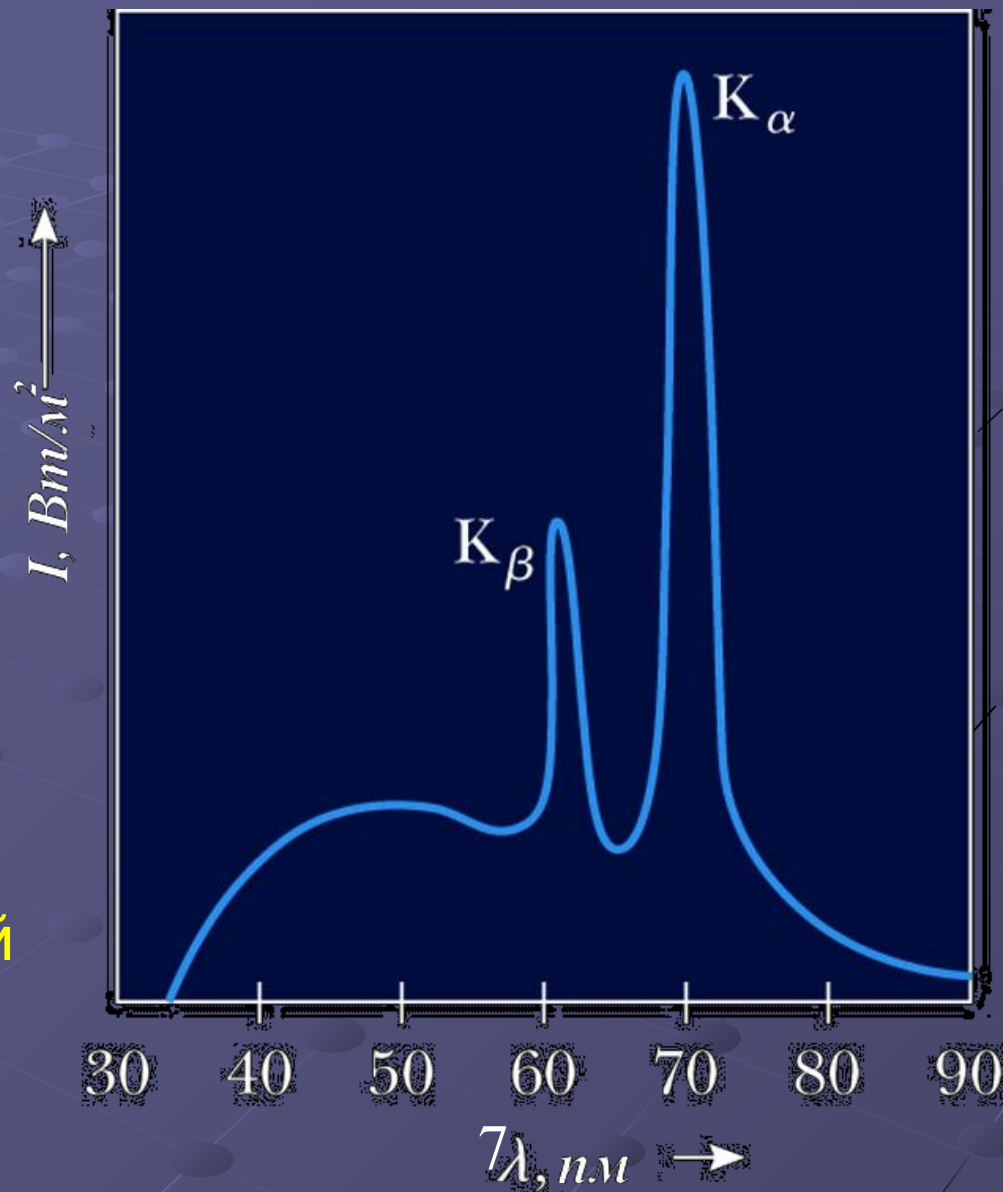
**Рентгеновские аппараты** (рентгеновские установки) — устройства для получения и использования рентгеновского излучения в технических и медицинских целях. Медицинские рентгеновские аппараты в зависимости от назначения разделяют на диагностические и терапевтические. По условиям эксплуатации, рентгеновские аппараты подразделяют на стационарные, передвижные и переносные. Диапазон напряжений и тока рентгеновских аппаратах в зависимости от их назначения приводится в таблице.

Типы аппаратов	Напряжение (кВ)	Сила тока (мА)
Диагностические		
Стационарные	100-150	60—1000
Передвижные	60—125	10—300
Переносные	50—85	5—15
Терапевтически		
е		
Стационарные	60—400	20—30
Передвижные	15-150	5—50

# ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

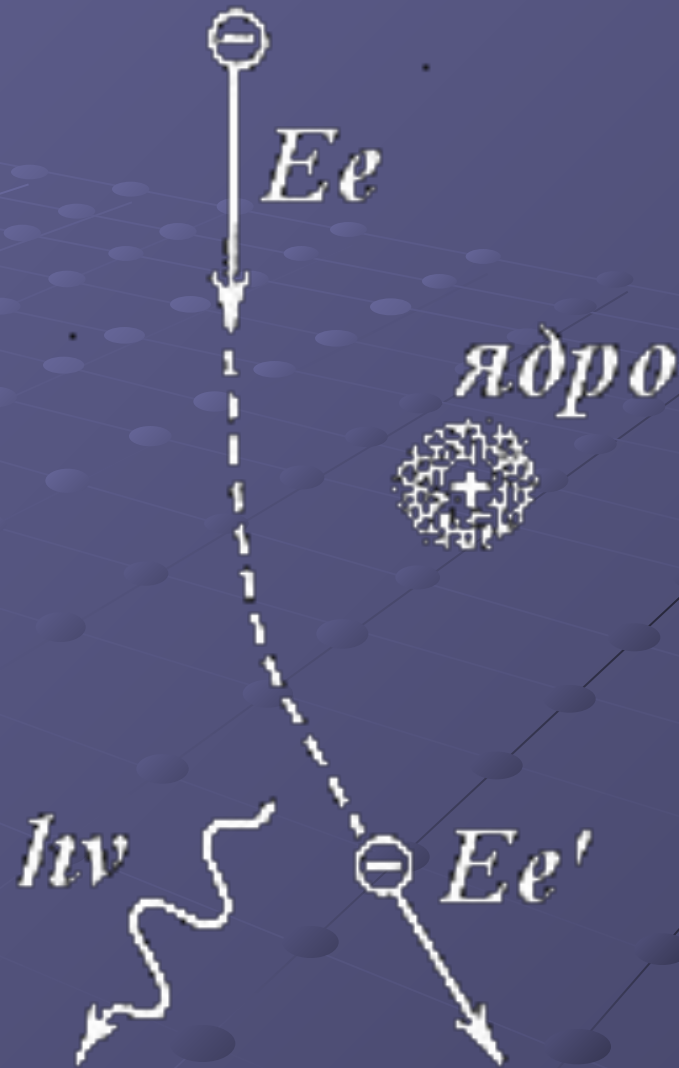
Рентгеновские лучи возникают при сильном ускорении заряженных частиц (**тормозное излучение**), либо при высокоэнергетических переходах в электронных оболочках атомов (**характеристическое излучение**).

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



# ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Когда ускоренные электроны проходят вблизи ядер атомов анода, из-за электрического поля ядер, они меняют направление движения. При этом испускается тормозное рентгеновское излучение (фотоны).



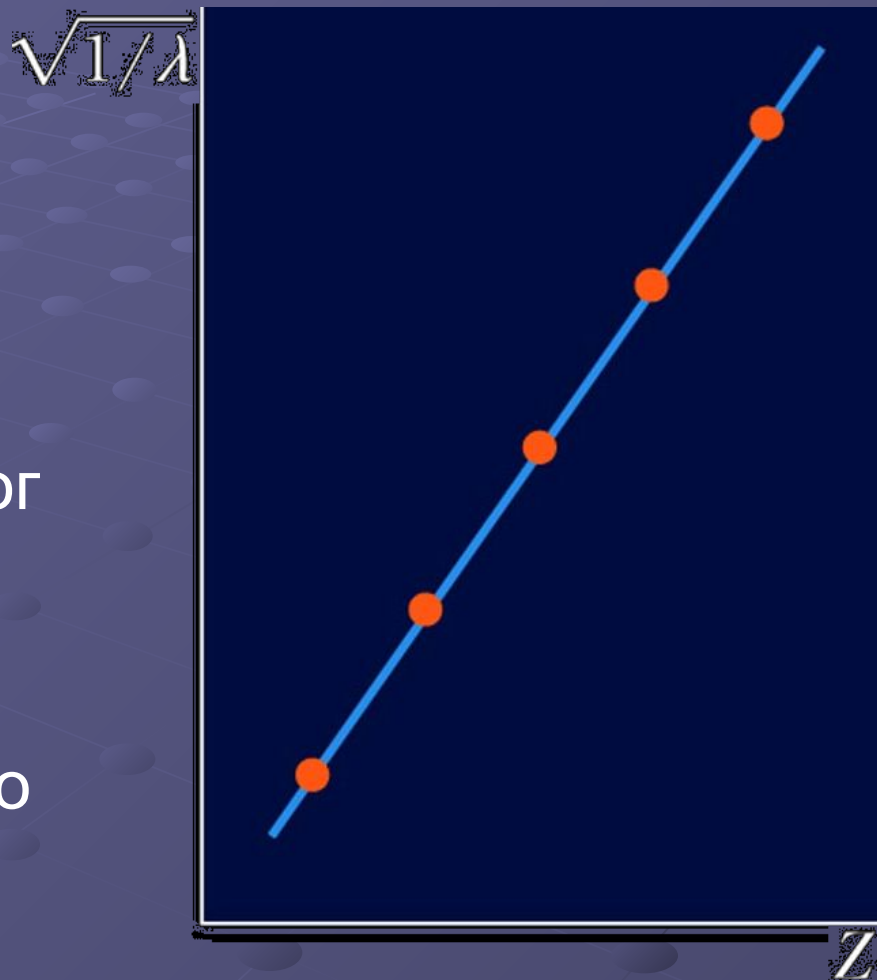


# ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

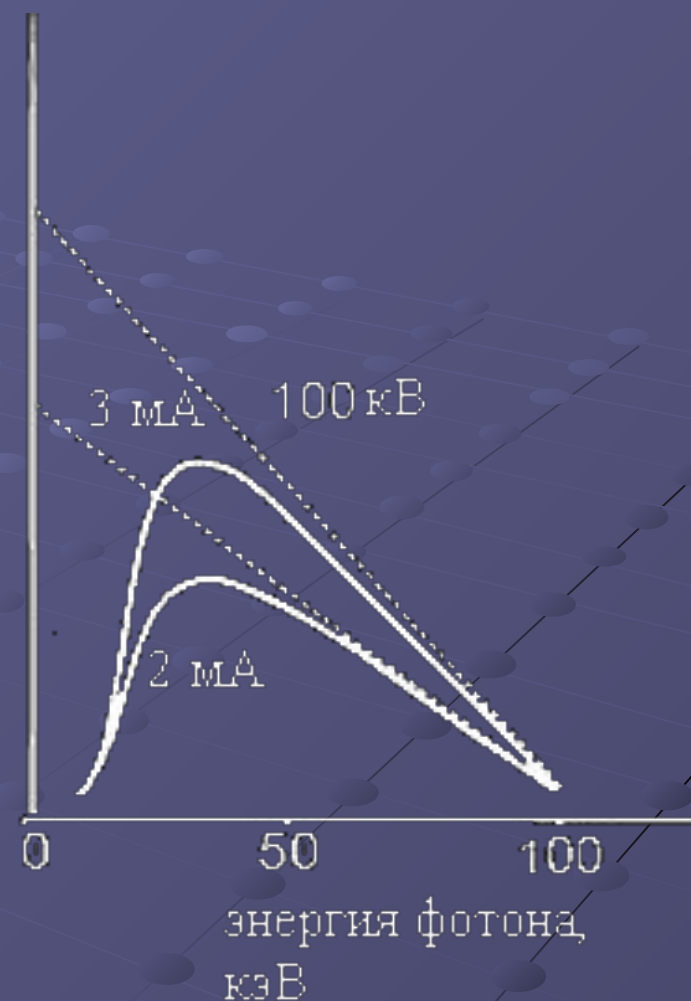
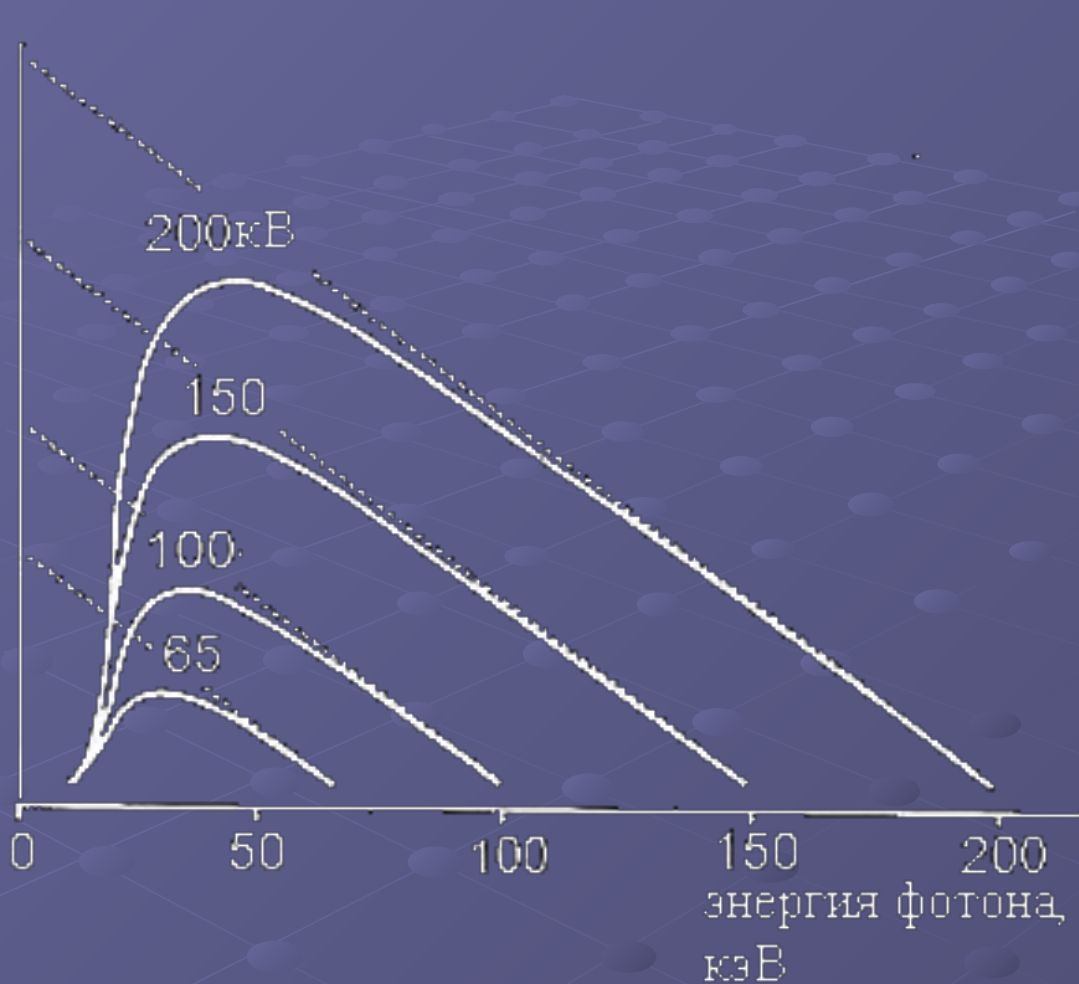
- Особенности строения атома могут обосновать характеристическое излучение
  - Бомбардирующий электрон сталкивается с электроном в металле анода, который находится на нижнем уровне
  - Если есть достаточная энергия, электрон выбивается из атома
  - Вакансия, образованная потерянным электроном, заполняется электроном, попадающим на вакансию из более высокого энергетического уровня
  - Переход сопровождается эмиссией фотона, энергия которого равна разности между этими двумя уровнями

# ГРАФИК МОЗЛИ

- $\lambda$  – длина волны  $K_{\alpha}$  линии
  - $K_{\alpha}$  - линия, образуемая электроном, переходящим с L уровня на K уровень
- Из этого графика, Мозли мог определить  $Z$  значения прочих элементов и получить периодическую систему элементов, отлично согласующуюся с их известными химическими свойствами



# ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОКА НА ЭНЕРГИЮ ФОТОНОВ



# МЕДИЦИНСКАЯ РЕНТГЕНОДИАГНОСТИКА

**Флюорография.** Заключается в фотографировании теневого изображения с просвечивающего экрана. Пациент находится между источником рентгеновского излучения и плоским экраном из люминофора (обычно иодида цезия), который под действием рентгеновского излучения светится. Биологические ткани той или иной степени плотности создают тени рентгеновского излучения, имеющие разную степень интенсивности. Врач-рентгенолог исследует теневое изображение на люминесцентном экране и ставит диагноз. Имеются разнообразные системы, усиливающие изображение, выводящие его на телевизионный экран или записывающие данные в памяти компьютера.

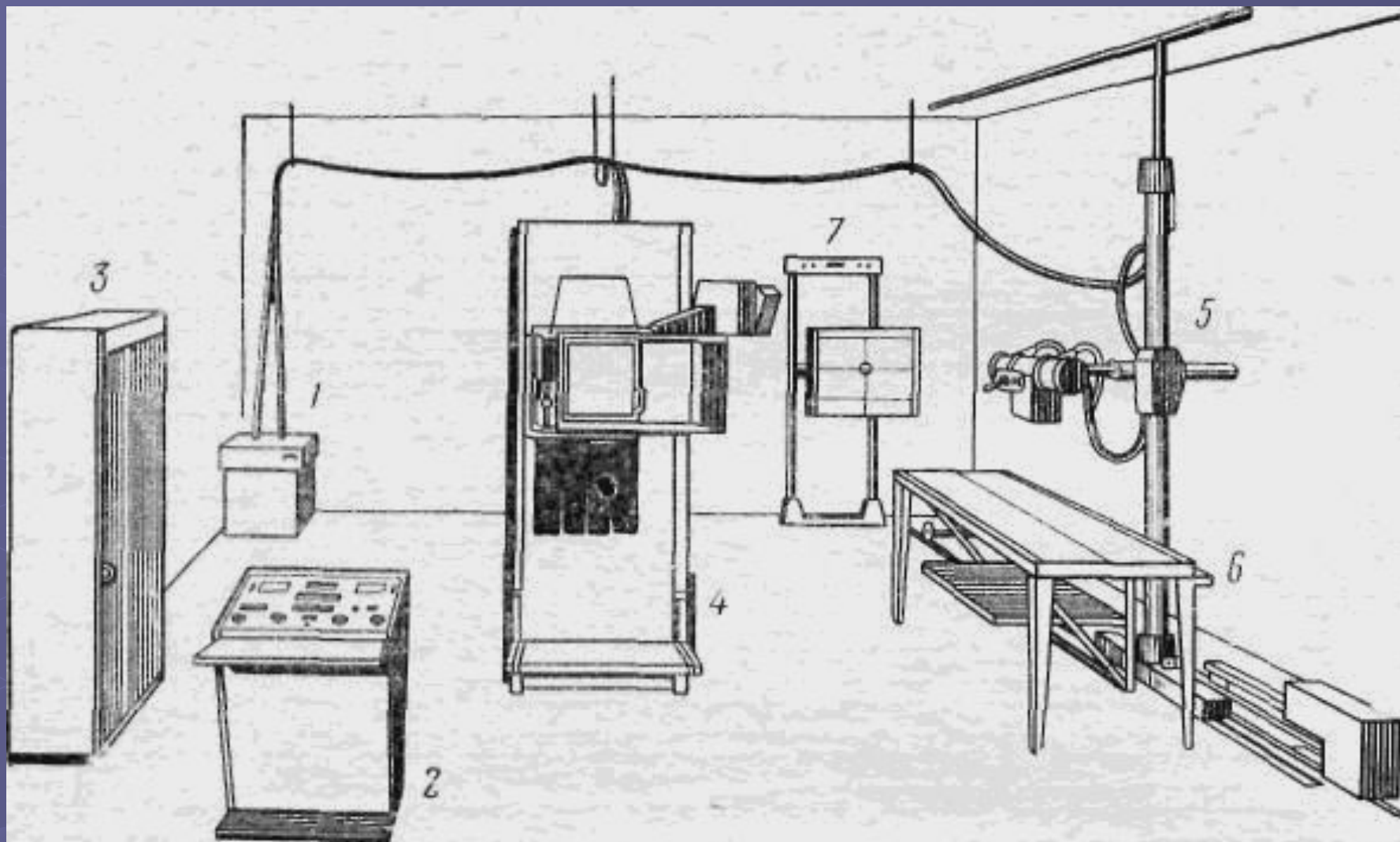
**Рентгенография.** Запись рентгеновского изображения непосредственно на фотопленке называется рентгенографией. В этом случае исследуемый орган располагается между источником рентгеновского излучения и фотопленкой, которая фиксирует информацию о состоянии органа в данный момент времени. Повторная рентгенография дает возможность судить о его дальнейшей эволюции. Рентгенография позволяет весьма точно исследовать целостность костных тканей, которые состоят в основном из кальция и непрозрачны для рентгеновского излучения, а также разрывы мышечных тканей. С ее помощью лучше, чем стетоскопом или прослушиванием, анализируется состояние легких при воспалении, туберкулезе или наличии жидкости. При помощи рентгенографии определяются размер и форма сердца, а также динамика его изменений у пациентов, страдающих сердечными заболеваниями.

# МЕДИЦИНСКАЯ РЕНТГЕНОДИАГНОСТИКА

**Контрастные вещества.** Прозрачные для рентгеновского излучения части тела и полости отдельных органов становятся видимыми, если их заполнить контрастным веществом, безвредным для организма, но позволяющим визуализировать внутренние органы. Контрастные вещества пациент принимает внутрь (бариевые соли при исследовании желудочно-кишечного тракта), либо они вводятся внутривенно (иодсодержащие растворы при исследовании почек и мочевыводящих путей). Эти методы вытесняются методами диагностики с применением радиоактивных атомов и ультразвука.

**Компьютерная томография.** В 1970-х годах был развит новый метод рентгеновской диагностики, основанный на полной съемке тела или его частей. Изображения тонких слоев ("срезов") обрабатываются компьютером, и окончательное изображение выводится на экран монитора. Такой метод называется компьютерной рентгеновской томографией. Он широко применяется в современной медицине для диагностики инфильтратов, опухолей и других нарушений мозга, а также для диагностики заболеваний мягких тканей внутри тела. Эта методика не требует введения инородных контрастных веществ и потому является быстрой и более эффективной, чем традиционные методики.

# РЕНТГЕНОДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС РУМ-22



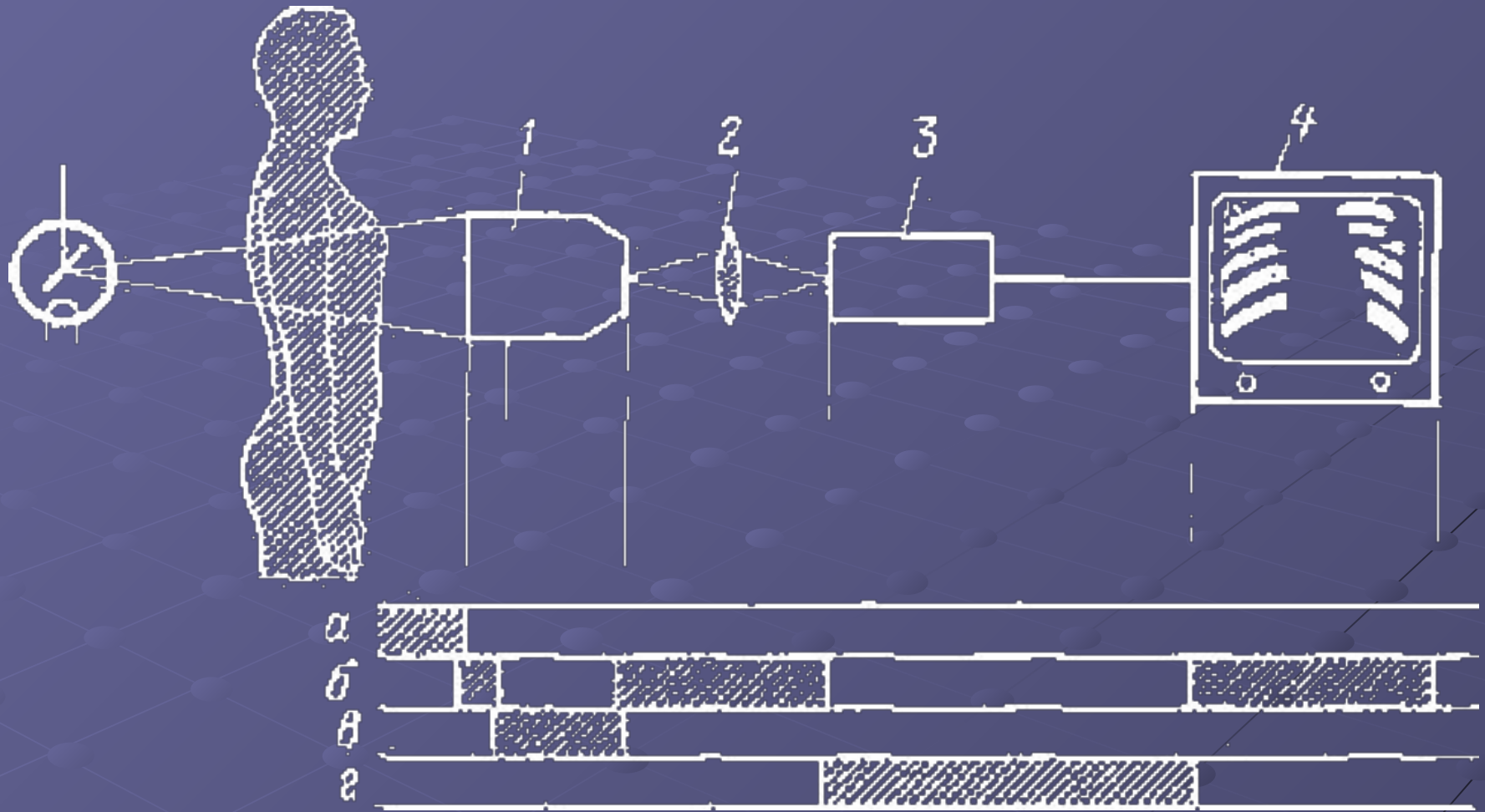
1 — высоковольтный генератор; 2 — пульт управления; 3 — дополнительный силовой шкаф; 4 — поворотный стол-штатив; 5 — штатив для снимков; 6 — стол для снимков; 7 — стенка для снимков.

# РЕНТГЕНОКИНЕМАТОГРАФИЯ

**Рентгенокинематография** - это киносъемка рентгеновского изображения с экрана электронно-оптического преобразователя с помощью кинокамеры на пленку разного размера: 16, 35 мм и др. Используется в основном для изучения быстро совершающихся динамических процессов, при контрастном исследовании полостей сердца, сосудов и других функционирующих органов. Снимки делают с различной скоростью. Данный метод позволяет видеть и фиксировать картину и работу органа одновременно; главная ценность этого метода — возможность повторить увиденную картину перед любой аудиторией.

**Рентгенотелевидение** — метод, позволяющий при помощи специальных устройств воспроизводить рентгеновское изображение на экране телевизора. Оптическое изображение объекта с экрана ЭОУ при помощи передающей телевизионной трубки преобразуется в электрический импульс, который по линии связи поступает в кинескоп (приемное устройство) телевизора. Телеэкран может располагаться на любом расстоянии от рентгеноаппарата, поэтому врач может находиться в другом помещении и проводить рентгеноскопию при обычном освещении. Возможно менять контрастность изображения и яркость свечения экрана в широких пределах. Этот метод исследования весьма ценен при рентген-операционных контрастных исследованиях (РОКИ): зондированиях сердца, кровеносных сосудов, ангиокардиографии, вазографии, других рентгенофункциональных исследованиях и при рентгенохирургических операциях. Запись изображения осуществляется фото- или видеорегистрацией с телеэкрана.

# РЕНТГЕНТЕЛЕВИДЕНИЕ

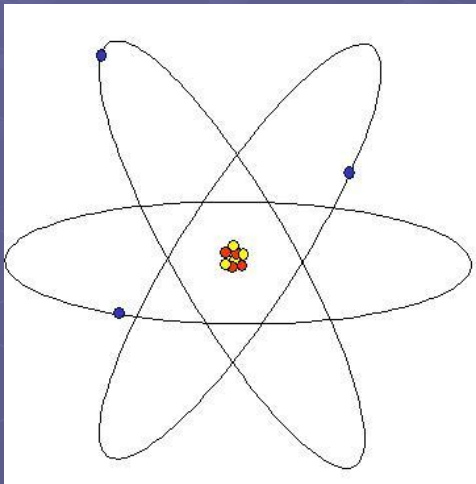


1 — электронно-оптический преобразователь; 2 — промежуточная оптика; 3 — телевизионная камера; 4 — телевизионный экран; а — рентгеновское излучение; б — видимый свет; в — поток электронов; г — электрические сигналы.



# ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

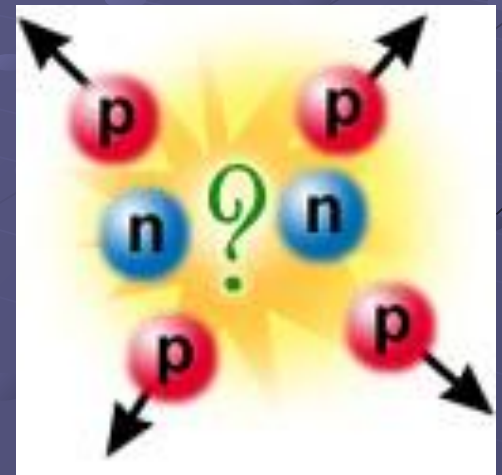
Современные представления:



АТОМ



ЯДРО



ПРОТОНЫ И  
НЕЙТРОНЫ

# ВВЕДЕНИЕ: РАЗВИТИЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

- **1896** – рождение ядерной физики
  - Беккерель обнаружил радиоактивность соединений урана
- Резерфорд показал, что у радиации три типа
  - Альфа (ядро He)
  - Бета (электроны)
  - Гамма (высокоэнергетические фотоны)
- **1911** Резерфорд, Гейгер и Марсден выполнили эксперименты по рассеиванию
  - установлена природа дефекта массы ядра
  - ядерная сила признана новым типом силы
- **1919** Резерфорд и коллеги сначала наблюдали ядерные реакции, в которых естественные альфа-частицы бомбардировали ядра азота, производя кислород
- **1932** Коккрофт и Уолтон впервые использовали искусственно ускоренные протоны для ядерных реакций
- **1932** Чедвик обнаружил нейтрон
- **1933** Кюри обнаружил искусственную радиоактивность
- **1938** Хэн и Стрессмен обнаружили деление ядер
- **1942** Ферми разработал первый реактор для управляемого ядерного деления

# НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ЯДРА



где X –  
обозначение  
химического  
элемента

- Все ядра состоят из протонов и нейтронов
  - Исключение - обычный водород только с протоном
- Атомное число,  $Z$ , равно числу протонов в ядре
- Нейтронное число,  $N$ , является числом нейтронов в ядре
- Массовое число,  $A$ , является числом нуклонов в ядре

$$A = Z + N$$

- **Нуклон** - общий термин, относится к протону или к нейтрону. Массовое число не то же самое, что масса

Пример:  ${}_{13}^{27}\text{Al}$

- Массовое число равняется 27, атомное число равняется 13, содержит 13 протонов. Содержит 14 ( $27 - 13$ ) нейтронов.

# МАССА И ЗАРЯД

## ЗАРЯД:

- У электрона есть единственный отрицательный заряд,  $-e$  ( $e = 1.60217733 \times 10^{-19}$  Кл)
- У протона есть единственный положительный заряд,  $+e$
- Таким образом заряд ядра равен  $Ze$
- Нейтрон заряда не имеет, что затрудняет его обнаружение

## МАССА:

- Удобно использовать единицы атомной массы,  $u$ , массы  $1u = 1.660559 \times 10^{-27}$  кг
- Основано на том, что масса одного атома  $C^{12}$  – в точности  $12u$
- В физике элементарных частиц в эВ (и производных единицах) обычно выражается не только энергия, но и масса элементарных частиц, исходя из эквивалентности массы и энергии:  $E = mc^2$  (или  $m = E/c^2$ ), где  $c$  — скорость света.  $1 u = 931.494 \text{ МэВ}/c^2$

# МАССЫ ЧАСТИЦ

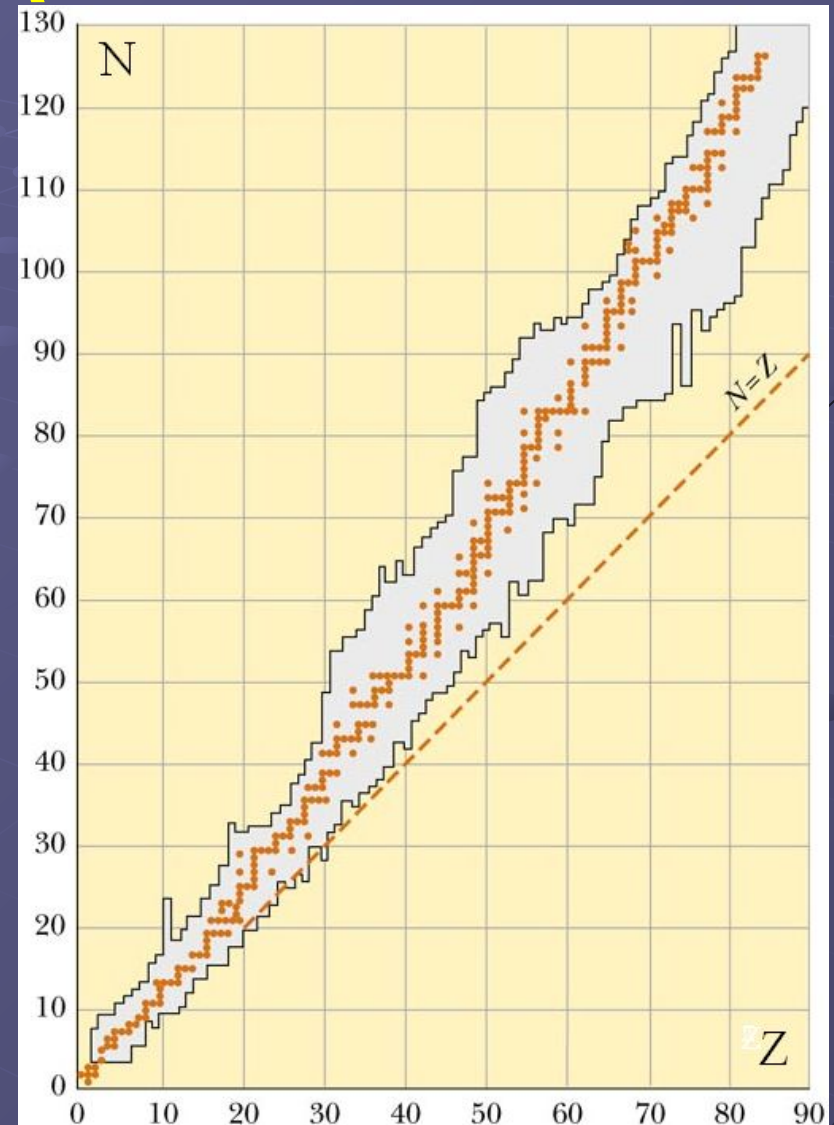
	МАССЫ		
ЧАСТИЦЫ	<i>кг</i>	<i>u</i>	<i>МэВ/с<sup>2</sup></i>
ПРОТОН	$1.6726 \times 10^{-27}$	1.007276	938.28
НЕЙТРОН	$1.6750 \times 10^{-27}$	1.008665	939.57
ЭЛЕКТРОН	$9.101 \times 10^{-31}$	$5.486 \times 10^{-4}$	0.511

# СТАБИЛЬНОСТЬ ЯДРА

- Между протонами есть очень многочисленные отталкивающие электростатические силы
  - Эти силы должны заставить ядро разбиваться
- Ядра устойчивы из-за присутствия другой силы малой дальности, названной **атомной силой**
  - Это сила притяжения, которая действует между всеми частицами ядра
  - Ядерная сила притяжения больше, чем отталкивающая сила Кулона на близких расстояниях в ядре

# СТАБИЛЬНОСТЬ ЯДРА

- Легкие ядра наиболее стабильны, если  $N = Z$
- Тяжелые ядра наиболее стабильны, если  $N > Z$ 
  - При увеличении числа протонов, растет сила Кулона и, таким образом, больше нуклеонов необходимо, чтобы сохранять стабильность ядра
  - Никакие ядра не устойчивы когда  $Z > 83$



# ИЗОТОПЫ

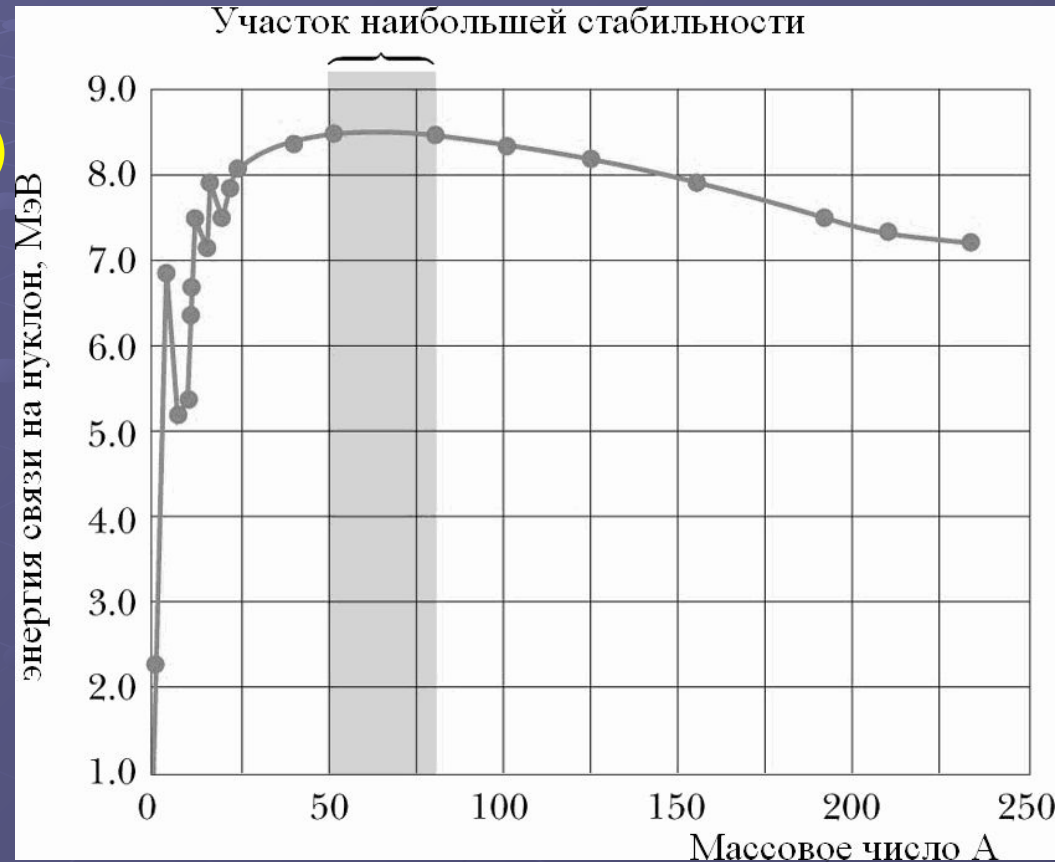
- Ядра всех атомов конкретного элемента должны содержать одинаковое число протонов  
Они могут содержать переменное число нейтронов
- У изотопов элемента то же самое  $Z$ , но отличаются  $N$  и  $A$
- Пример:





# ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ

- Полная энергия связанной системы (ядра) меньше суммы энергий отдельных нуклонов
  - Эта разность энергий называется *энергией связи* ядра
    - Она может считаться количеством энергии, которую нужно передать ядру, чтобы разбить его на отдельные протоны и нейтроны



Энергия связи на нуклон

# ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ

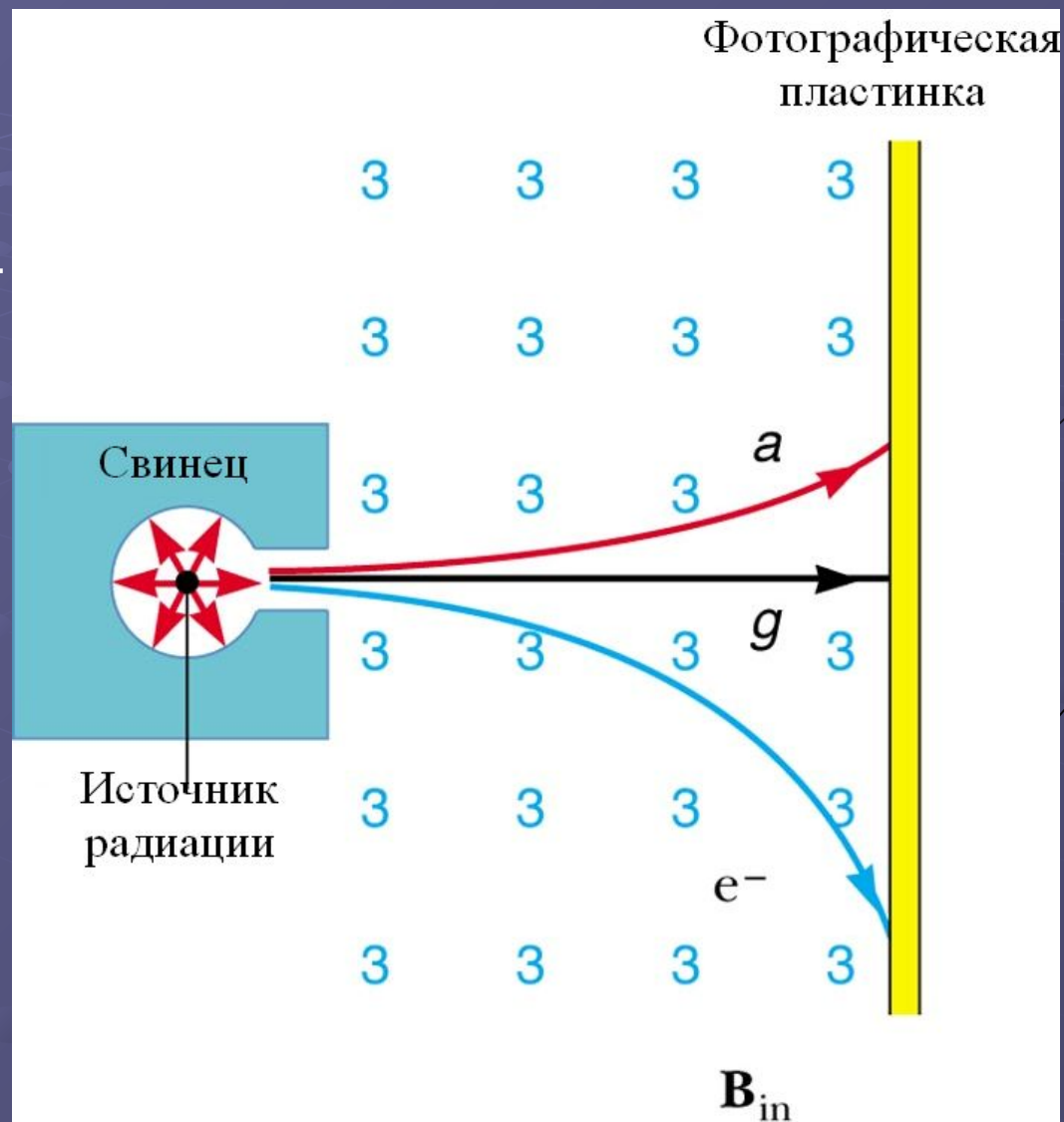
- За исключением легких ядер, энергия связи - около 8 МэВ на нуклон
- Кривая достигает максимума при  $A = 60$ 
  - Ядра с массовыми числами, больше или меньше чем 60 так сильно не связаны как те, что возле середины периодической таблицы
- Кривая плавно изменяется при  $A > 40$ 
  - Это предполагает, насыщение ядерной силы
- Отдельный нуклон может взаимодействовать с ограниченным числом других нуклонов

# РАДИОАКТИВНОСТЬ

- **Радиоактивностью** называют самопроизвольное превращение одного химического элемента в изотоп другого элемента, сопровождающееся испусканием элементарных частиц или излучения
- **Эксперименты** показали, что радиоактивность - результат распада или деления нестабильных ядер
- Возможны **три** типа излучения
  - **Альфа-частицы**
    - Частицы ядра  ${}^4\text{He}$
  - **Бета-частицы**
    - Частицы - или электроны или позитроны
    - **Позитрон** - античастица электрона, подобная электрону кроме заряда,  $+e$
  - **Гамма-лучи**
    - Гамма-лучи - высокоэнергетические фотоны

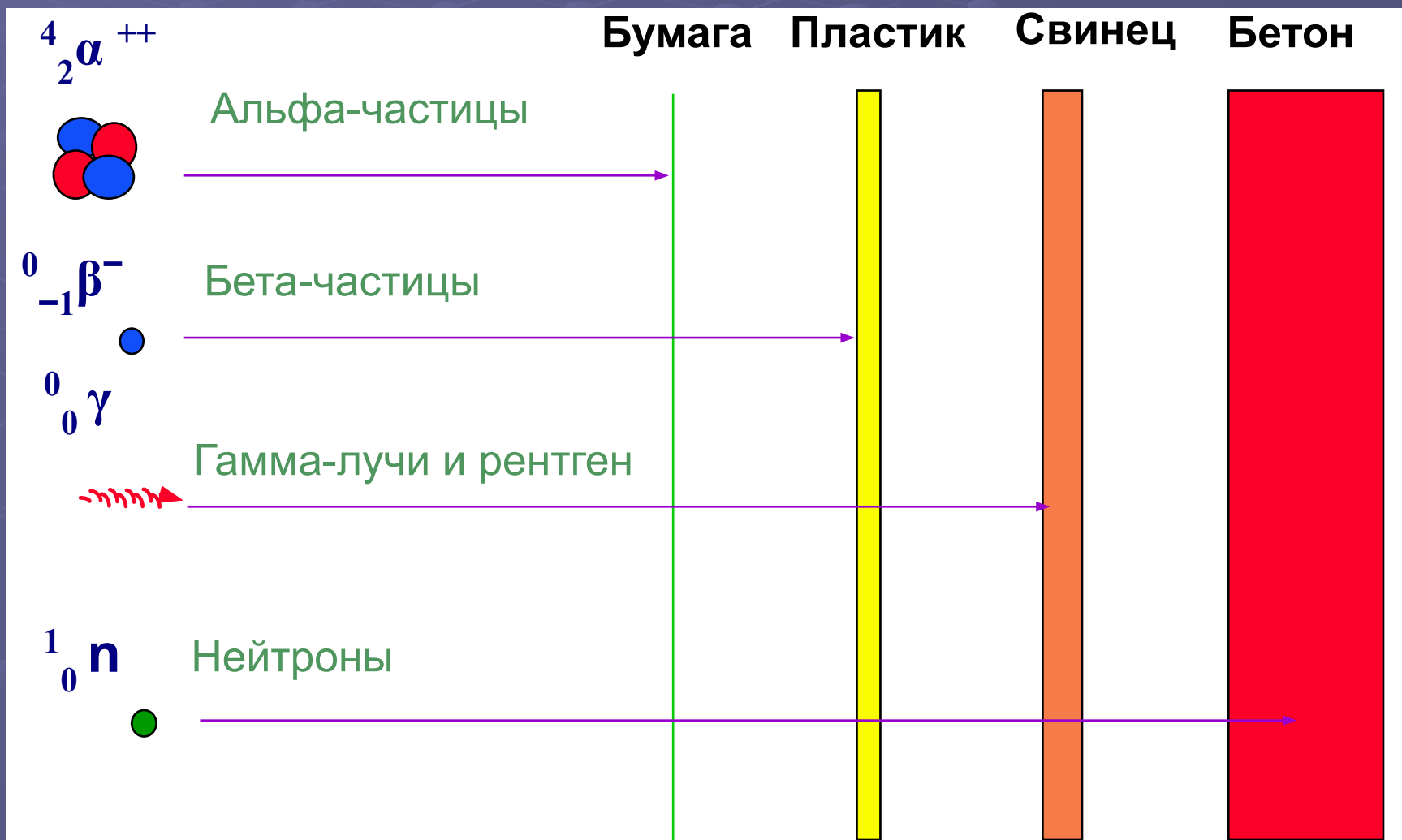
# РАДИОАКТИВНОСТЬ

- Гамма частицы не имеют заряда
- Альфа-частицы отклонены вверх
- Бета-частицы отклонены вниз
- Позитрон был бы отклонен вверх



# ПРОНИКАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЧАСТИЦ

- Альфа-частицы способны проникать через листок бумаги
- Бета-частицы способны проникать через несколько мм алюминия
- Гамма-лучи способны проникать через несколько см свинца



# ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

- Число распадов, произошедшее за короткий интервал времени, пропорционально числу атомов в образце.

$$\Delta N = -\lambda N (\Delta t)$$

- $\lambda$  - константа распада, определяющая его скорость
- Скорость или активность распада образца,  $R$ , определяется числом распадов за секунду

$$R = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| = \lambda N$$

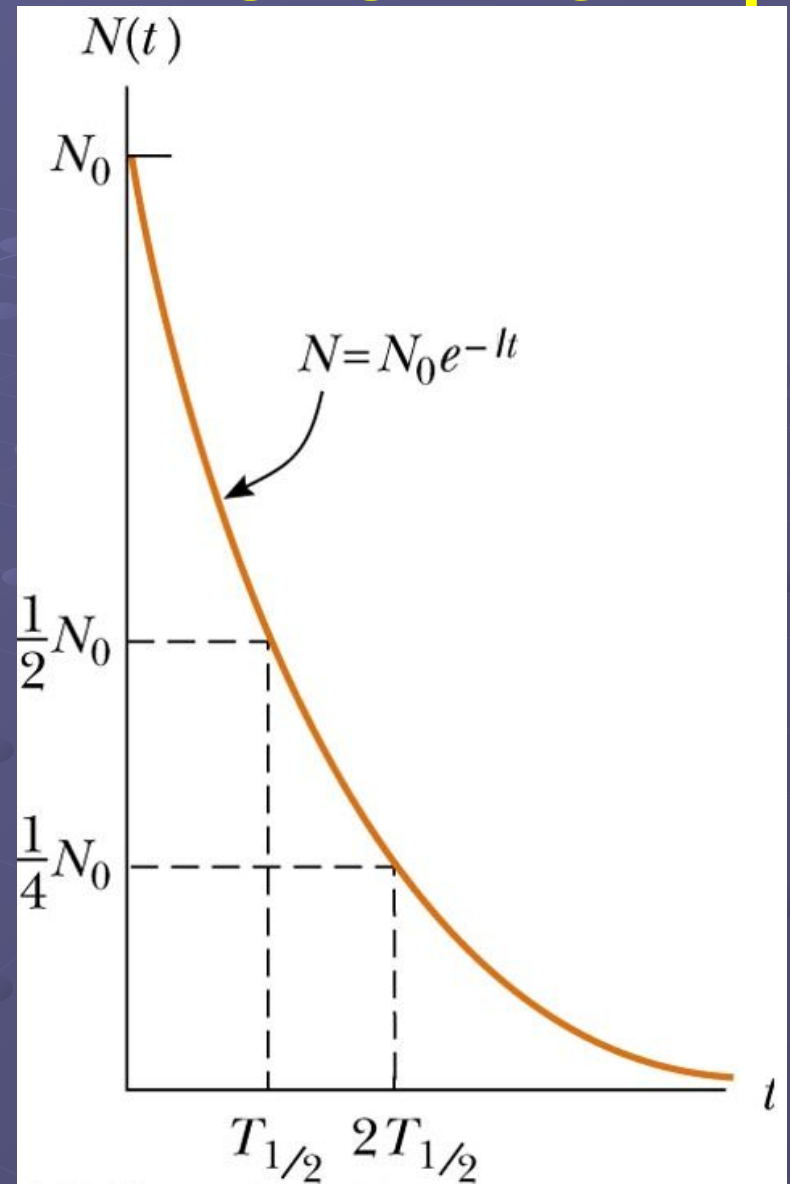
# КРИВАЯ РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

- Кривая радиоактивного распада соответствует уравнению

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

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

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$



# ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

- Активность,  $R$ , измеряется в Кюри, Ки
  - $1 \text{ Ки} = 3.7 \times 10^{10}$  распадов в секунду
- В системе СИ - Беккерель, Бк
  - $1 \text{ Бк} = 1$  распад в секунду
  - Т.е.,  $1 \text{ Ки} = 3.7 \times 10^{10}$  Бк
- Наиболее часто используют мКи и мкКи

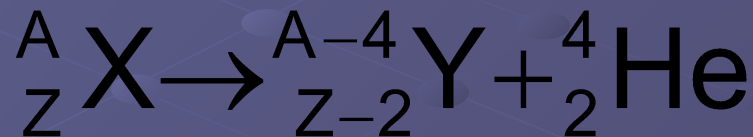


# ПРОЦЕССЫ РАСПАДА

- Процесс перехода одного элемента в другой называют непосредственным распадом или превращением
- Сумма массовых чисел,  $A$ , должна быть равной в обеих частях уравнения
- Сумма атомных чисел,  $Z$ , должна быть равной в обеих частях уравнения
- Сохранение массы, энергии и импульса должно соблюдаться

# АЛЬФА – РАСПАД

- Когда ядро испускает альфа-частицу, оно теряет два протона и два нейтрона
- N уменьшается на 2
- Z уменьшается на 2
- A уменьшается на 4
- Символически



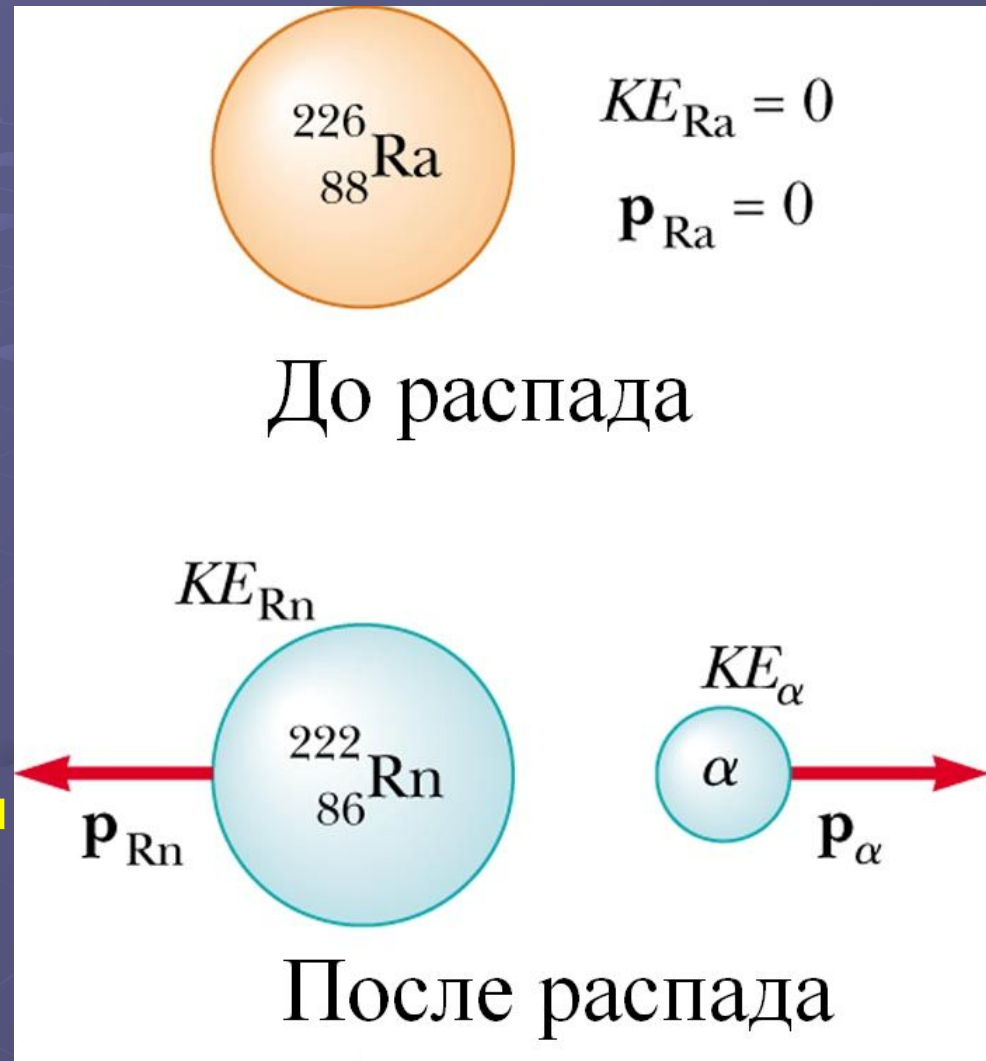
- X называют **материнским** ядром
- Y называют **дочерним** ядром

# АЛЬФА – РАСПАД

- Распад  $^{226}_{88}\text{Ra}$



- Период полураспада 1600 лет
- Дефект массы переходит в кинетическую энергию
- Моменты двух частиц равны и противоположны по направлению

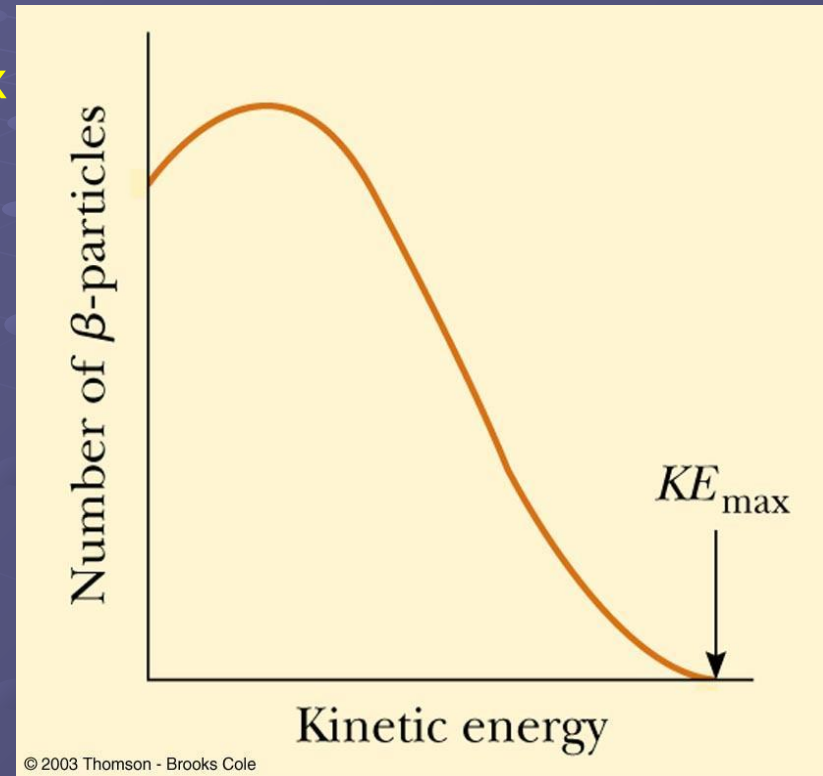


# БЕТА – РАСПАД

- Во время бета распада у дочернего ядра есть то же самое число нуклонов как у материнского, но атомное число - меньше
- Кроме того, ядром испускается электрон (позитрон)
  - Ядро содержит протоны и нейтроны
  - Процесс происходит, когда нейтрон превращается в протон и электрон
- Энергия сохраняется

# БЕТА – РАСПАД

- Энергия, высвобожденная в процессе распада, должна **почти полностью** перейти в кинетическую энергию электрона
- Эксперименты показали, что **у немногих** электронов была эта величина кинетической энергии
- Чтобы учесть эту “недостающую” энергию, в 1930 Паули предположил существование другой частицы
- Энрико Ферми позже назвал эту частицу **"нейтрино"**
- Свойства нейтрино
  - Нулевой электрический заряд
  - Масса, намного меньшая, чем электрон, но, вероятно, не нулевая
  - Спин  $\frac{1}{2}$
  - Очень слабое взаимодействие с веществом



# БЕТА – РАСПАД

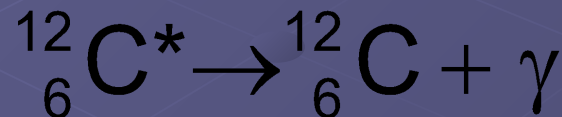
- Символически



- $\nu$  - обозначение **нейтрино**
- $\bar{\nu}$  - обозначение **антинейтрино**
- Делаем вывод, что при бета-распаде, испускаются пары частиц
  - электрон и антинейтрино
  - позитрон и нейтрино

# ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ

- Гамма-лучи испускаются, когда ядро переходит из возбужденного состояния в состояние с меньшей энергией (радиационный переход).
- Подобно процессу электронных переходов на низшие энергетические уровни и испусканию фотонов
- Возбужденные состояния ядра - результат переходов протонов или нейтронов
- Возбужденные состояния ядра могут быть результатом сильного столкновения или, более вероятно, альфа- или бета-излучения
- Пример последовательности распада
  - Первый распад – бета-излучение
  - Второй шаг - гамма-излучение



- C\* указывает, что ядро углерода находится в возбужденном состоянии
- Гамма-излучение не изменяет ни A, ни Z

# ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ

## • РАДИОУГЛЕРОДНЫЙ АНАЛИЗ

- Бета распад  $^{14}\text{C}$  используется до настоящего времени для датировки органические образцы
- Используется соотношение  $^{14}\text{C}$  к  $^{12}\text{C}$

## • ДЕТЕКТОРЫ ДЫМА

- Детекторы дыма ионизационного типа содержат источник радиации для ионизации воздуха в палате
- Напряжение и ток сохраняются
- Когда дым поступает в палату, уменьшается ток и издается звуковой сигнал

## • ЗАГРЯЗНЕНИЕ РАДОНОМ

- **Радон** - инертный, газообразный элемент, связанный с распадом радия
- Присутствует в урановых рудниках и в определенных типах камня, кирпичей, и т.д. которые могут использоваться при строительстве
- Также может выходить из земли



# КЛАССИФИКАЦИЯ ЯДЕР

- Нестабильные ядра существующие в природе
  - Источники естественной радиоактивности
- Ядра полученные в лаборатории посредством ядерных реакций
  - Источники искусственной радиоактивности
- Существуют три типа естественной радиоактивности
  - Уран
  - Актиний
  - Торий

# ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЕЩЕСТВО

- Когда ионизирующее излучение действует на вещество, происходит взаимодействие между радиоактивной частицей и электронами и ядрами вещества. Тип взаимодействия и его эффект зависит не только от типа излучения ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , рентген), но также и от энергии частицы. Такое взаимодействие может быть представлено в виде столкновения с электронами, расположенными вокруг ядер атома вещества, в результате которого энергия излучения полностью, или частично или не передана электронам вещества. В зависимости от количества энергии электрон может перейти в более высокое энергетическое состояние (возбуждение) или лишиться атомной связи (ионизация). Именно из-за этой способности образовывать ионы термин **ионизирующее излучение** получил свое название.

# ДЕЙСТВИЕ АЛЬФА-ЧАСТИЦ НА ВЕЩЕСТВО

- Тяжелые заряженные частицы взаимодействуют главным образом с электронами атомных оболочек, вызывая ионизацию атомов. Максимальная энергия, которая может быть передана в одном акте взаимодействия тяжелой частицей, движущейся со скоростью  $v \ll c$ , неподвижному электрону, равна  $E_{\text{макс}} = 2m_e v^2$ .
- Проходя через вещество, заряженная частица совершает десятки тысяч соударений, постепенно теряя энергию. Тормозная способность вещества может быть охарактеризована величиной удельных потерь  $dE/dx$ . Удельные ионизационные потери представляют собой отношение энергии  $E$  заряженной частицы, теряемой на ионизацию среды при прохождении отрезка  $x$ , к длине этого отрезка. Удельные потери энергии возрастают с уменьшением энергии частицы и особенно резко перед остановкой в веществе (пик Брэгга). Этот эффект используется в **терапии рака**, где очень важно обеспечить максимальное выделение энергии в глубоко расположенной опухоли, причиняя при этом минимальный вред окружающей здоровой ткани.

# ДЕЙСТВИЕ АЛЬФА-ЧАСТИЦ НА ВЕЩЕСТВО

- Тяжелые заряженные частицы взаимодействуют в основном с атомными электронами и поэтому мало отклоняются от направления своего первоначального движения. Вследствие этого пробег тяжелой частицы  $R$  измеряют расстоянием по прямой от источника частиц до точки их остановки. Обычно пробег измеряется в единицах длины (м, см, мкм) или длины, умноженной на плотность

**Пробеги альфа-частиц в воздухе, биологической ткани, алюминии.**

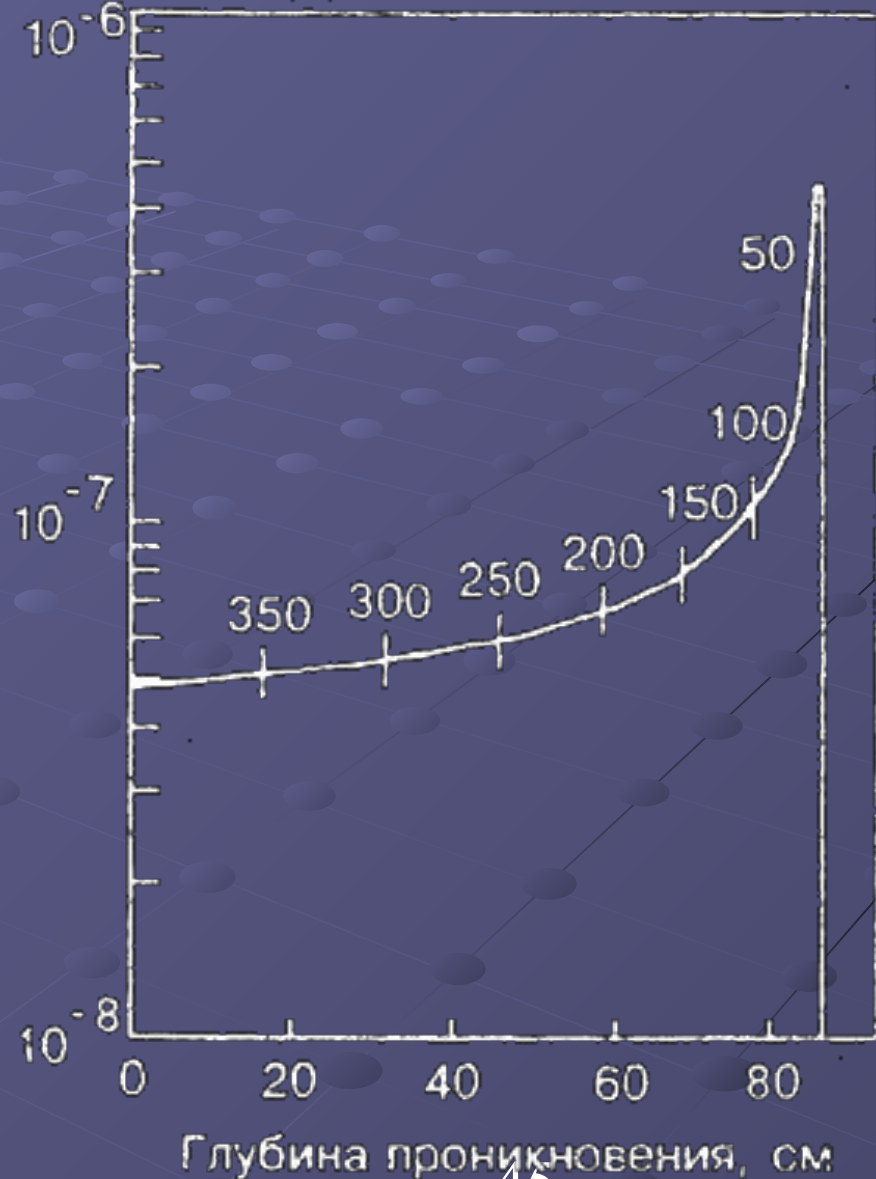
Энергия частиц, МэВ	4	6	8	10
воздух, см	2.5	4.6	7.4	10.6
Биологическая ткань, мкм	31	56	96	130
алюминий, мкм	16	30	48	69

## Пробеги протонов в алюминии

Энергия протонов, МэВ	1	3	5	10	20	40	100	1000
Пробег, см	1.3	$7.8 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$6.2 \cdot 10^{-2}$	$2.7 \cdot 10^{-1}$	$7.0 \cdot 10^{-1}$	3.6	148
Пробег, мг/см <sup>2</sup>	$3.45 \cdot 10^{-3}$	21	50	170	560	$1.9 \cdot 10^3$	$9.8 \cdot 10^3$	$400 \cdot 10^3$

# ДЕЙСТВИЕ АЛЬФА-ЧАСТИЦ НА ВЕЩЕСТВО

-  $(dE/dx) 10^{-9}$  Дж/см



Зависимость тормозной способности биологической ткани для протонов с начальной энергией 400 МэВ от глубины проникновения протонов в слой вещества. Численные значения над кривой - энергия протона (в МэВ) на различной глубине проникновения. В конце пробега - пик Брэгга.

# ДЕЙСТВИЕ БЕТА-ЧАСТИЦ НА ВЕЩЕСТВО

- Прохождение электронов и позитронов через вещество отличается от прохождения тяжелых заряженных частиц. Главная причина - малые массы покоя электрона и позитрона. Это приводит к относительно большому изменению импульса при каждом столкновении, что вызывает заметное изменение направления движения электрона или позитрона и как результат - электромагнитное радиационное излучение.
- Ионизационные потери электронов преобладают в области относительно небольших энергий. С ростом энергии электрона  $E$  растут радиационные потери. Отношение ( $K$ ) удельных радиационных и ионизационных потерь энергии определяется зависимостью  $K = (dE/dx)_{\text{рад}} / (dE/dx)_{\text{иониз}} = 1.26 \cdot 10^{-3} ZE$ , где  $E$  выражается в МэВ,  $Z$  - средний заряд ядер атомов среды.
- Энергия электронов  $E_{\text{крит}}$ , при которой величина удельных радиационных потерь равна величине удельных ионизационных потерь - называется **критической**.
- Различают четыре процесса взаимодействия:
  - упругие соударения
  - неупругие соударения
  - тормозное излучение
  - радиация Черенкова (не входит в курс)

# ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

- При **упругом** соударении,  $\beta$ -частица сталкивается с ядром или плотно связанным электроном, но не передает энергию, а изменяет направление движения.
- При **неупругом** столкновении электронам материала передается энергия. В зависимости от энергии  $\beta$ -частицы, такое неупругое столкновение обычно приводит к ионизации. Однако, если испущенная энергия не достаточно большая, чтобы освободить электрон из атома, возбужденный атом распадается к стандартному состоянию эмиссией рентгеновских лучей. Если переданная энергия достаточно большая, электрон выбивается из вещества, что, в свою очередь, вызывает 'вторичные' возбуждения и ионизации.
- Когда  $\beta$ -частицы проходят очень близко к ядру атома, они отклоняются. Этот тип взаимодействия имеет место у  $\beta$ -частиц с энергией выше, чем 1 МэВ, у которых часть кинетической энергии может быть преобразована в излучение фотона, так называемое **тормозное излучение**.

# ДЕЙСТВИЕ ФОТОНОВ

- Воздействие потока фотона на вещество сопровождается четырьмя эффектами:
- **рассеивание Рэля**
- **фотоэлектрическое поглощение**
- **поглощение и рассеивание Комптона**
- **производство пары и аннигиляция**

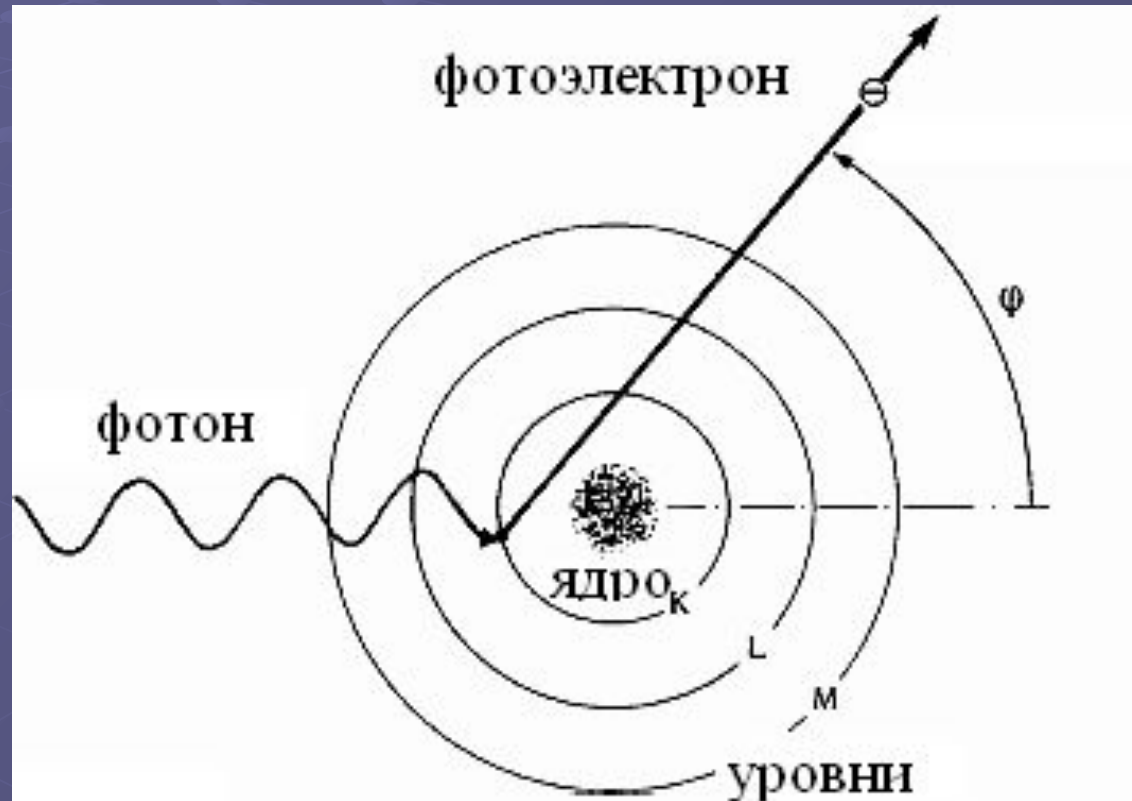
## РАССЕИВАНИЕ РЭЛЕЯ

- **Рассеивание Рэля**, происходит заметно только при излучении фотона с низкой энергией. Этот процесс может рассматриваться как взаимодействие фотона с атомом в целом. С этим энергия почти не передается атому. Фотон только изменяет направление движения.



# ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

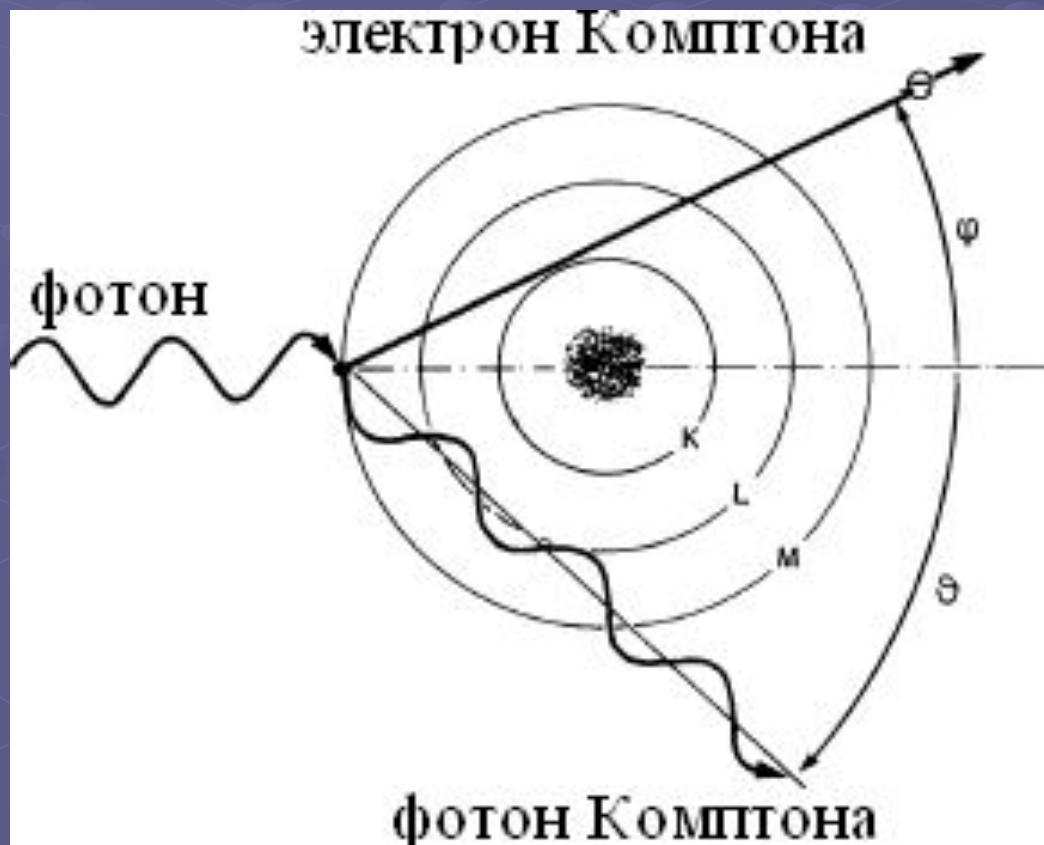
- В фотоэлектрическом процессе фотон передает всю свою энергию электрону (фотоэлектрону), который впоследствии выбивается из атома (ионизация). Кинетическая энергия, которую получает электрон, равняется энергии фотона за вычетом энергии связи исходного электрона.



$\varphi$  - угол испускания фотоэлектрона

# ЭФФЕКТ КОМПТОНА

Особенность эффекта Комптона – в том, что только часть энергии передается от входящего фотона электрону. Освобожденный электрон, который называют электроном Комптона (**электрон отдачи**), достигает определенной скорости, которая зависит от переданной энергии. Остальная часть



фотон с  
движущегося в другом  
и поэтому  
**фотоном**". Из-за  
энергии у  
длинная длина  
ного.

$\varphi$  - угол испускания электрона Комптона  $\theta$  - угол испускания фотона

# ОБРАЗОВАНИЕ И АННИГИЛЯЦИЯ ПАР

- С энергиями фотона, больше, чем 1.022 МэВ может произойти образование пар, как альтернатива эффекту Комптона. Когда такой высокоэнергетичный фотон близко подходит к ядру, преобразование энергии в массу может произойти из-за электрического поля ядра. Фотон превращается в электрон и позитрон с той же самой массой, но противоположным зарядом. Если энергия фотона - например, 2 МэВ,  $2 \times 0.511 = 1.022$  МэВ переходят к паре электрон-позитрон, и остаток (0.978 МэВ) разделяется на кинетические энергии электрона и позитрона. В этом процессе, в котором оригинальный фотон исчезает полностью, излишек импульса передается ядру.

# РЕГИСТРАЦИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

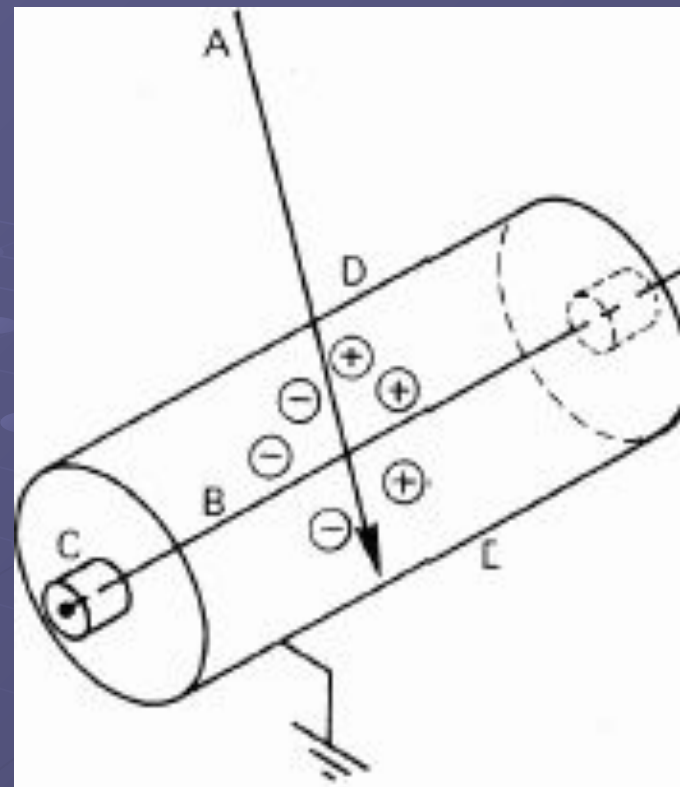
- Существуют различные методы регистрации и дозиметрии:
  - ионизационный, связанный с прохождением ионизирующего излучения в газах;
  - полупроводниковый, в котором газ заменен твердым телом; сцинтиляционный;
  - люминесцентный;
  - фотографический.
- Эти методы положены в основу работы **дозиметров**. Среди газонаполненных датчиков ионизирующего излучения можно отметить ионизационные камеры, камеры деления, пропорциональные счетчики и счетчики Гейгера-Мюллера. Последние относительно просты, наиболее дешевы, не критичны к условиям работы и получили наибольшее распространение в бытовых детекторах-индикаторах радиоактивности.

# ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА

Ионизационная камера - это газонаполненный датчик, предназначенный для измерения уровня ионизирующего излучения.

Измерение уровня излучения происходит путём измерения уровня ионизации газа в рабочем объёме камеры, который находится между двумя электродами. Между электродами создаётся разность потенциалов. При наличии ионов в газе между электродами возникает ионный ток, который может быть измерен. Ток при прочих равных условиях пропорционален скорости возникновения ионов и, соответственно, мощности дозы облучения.

Газ, которым заполняется ионизационная камера, обычно является инертным газом (или их смесью) с добавлением легко ионизирующегося соединения (углеводорода - метана или ацетилена). Открытые ионизационные камеры (ионизационные детекторы дыма) заполнены воздухом.



A – входящий протон;

B – анод;

C – изолятор;

D – катод (корпус);

R – резистор;

U – высоковольтное напряжение

# ЗАЩИТА ОТ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

- Если источники радиоактивного излучения находятся вне организма человека и человек облучается снаружи, говорят о **внешнем облучении**.
- Внешнее облучение происходит от непосредственного взаимодействия радиоактивных ионизирующих излучений внешних источников с атомами биологических субстратов организма. Защититься от внешнего излучения можно, поставив на пути движения излучений тот или иной защитный экран и/или применив средства индивидуальной защиты. Специальная защитная одежда полностью защищает от альфа-излучения и частично – от бета-излучения, рентгеновского или гамма-излучения. Применяют антиконтаминационные костюмы, перчатки, капюшоны, сапоги, перчатки, очки, освинцованные фартуки.
- Если радиоактивные вещества, находящиеся в воздухе, пище, воде, попадают внутрь организма человека, то источники радиоактивного излучения оказываются внутри организма (**внутреннее облучение**).
- Внутреннее облучение всегда связано с попаданием в организм человека радиоактивных веществ, разнообразие которых обуславливает разнообразие механизмов поглощения, усвоения и вывода этих веществ из организма, степень участия в метаболизме. В результате радиоактивные вещества могут задерживаться и даже накапливаться в организме. Распадаясь, они облучают расположенные вокруг них ткани.
- Уменьшение внутреннего облучения достигается только средствами индивидуальной защиты органов дыхания, служащих для защиты дыхательных путей от радиоактивных веществ, находящихся в воздухе, и специальным рационом питания.

# ЗАЩИТА ОТ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

- Обеспечение радиационной безопасности требует комплекса многообразных защитных мероприятий, зависящих от конкретных условий работы с источниками ионизирующих излучений, а также от типа источника.
- Защита временем основана на сокращении времени работы с источником, что позволяет уменьшить дозы облучения персонала. Этот принцип особенно часто применяется при непосредственной работе персонала с малыми радиоактивностями.
- Защита расстоянием – достаточно простой и надежный способ защиты. Это связано со способностью излучения терять свою энергию во взаимодействиях с веществом: чем больше расстояние от источника, тем больше процессов взаимодействия излучения с атомами и молекулами, что в конечном итоге приводит к снижению дозы облучения персонала.
- Защита экранами – наиболее эффективный способ защиты от излучений. В зависимости от вида ионизирующих излучений для изготовления экранов применяют различные материалы, а их толщина определяется мощностью и излучением.

# ФАКТОРЫ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

- Три фактора радиационной защиты - время, расстояние и защита. Чтобы максимально снизить дозу, необходимо минимизировать время воздействия источников радиации .

Обратноквадратичная зависимость :

$$\dot{D} = \Gamma \times \frac{A}{r^2}$$

где:  $\dot{D}$  – мощность дозы (мкЗв/ч);

$A$  – радиоактивность (Бк);

$\Gamma$  – константа источника (мкЗв·м<sup>2</sup>/Бк·ч);

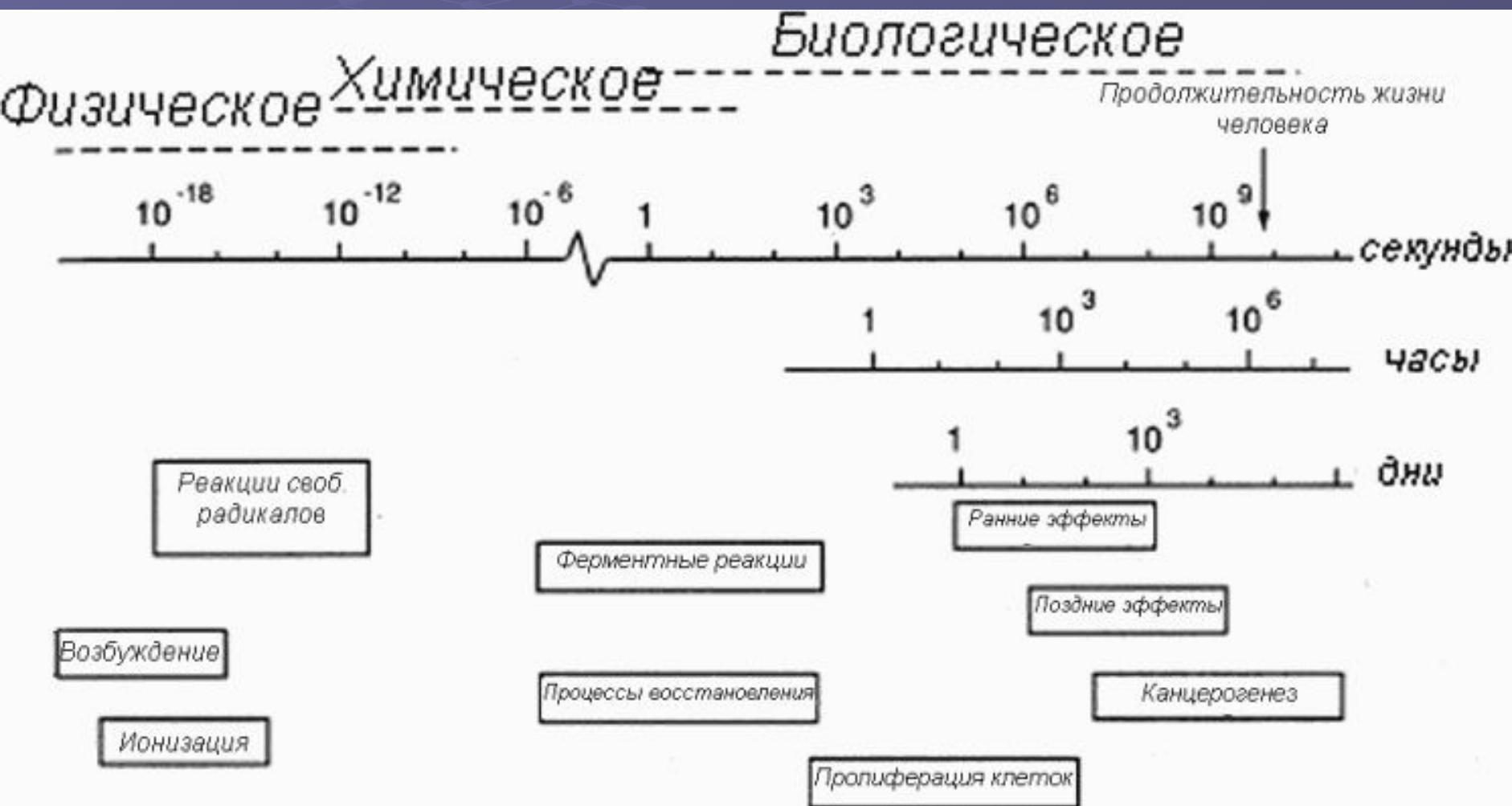
$r$  – расстояние (м).



# ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТКАНИ

- Проникающие в ткани альфа- и бета-частицы теряют энергию вследствие электрических взаимодействий с электронами атомов, около которых они проходят. Гамма- и рентгеновское излучение передают свою энергию веществу что также приводят к электрическим взаимодействиям.
- **Электрические взаимодействия.** При действии ионизирующего излучения на атом ткани организма, от него отрывается электрон заряженный отрицательно, оставшаяся часть атома, становится положительно заряженной (**процесс ионизации**). Оторвавшийся электрон может далее ионизировать другие атомы.
- **Физико-химические изменения.** Свободный электрон и свободный атом долго не могут пребывать в таком состоянии. Вскоре они участвуют в сложной цепи реакций, ведущих к образованию новых молекул. Также могут образовываться чрезвычайно реакционноспособные молекулы, "свободные радикалы".
- **Химические изменения.** Свободные радикалы реагируют как друг с другом, так и с другими молекулами через цепочку реакций. Они могут вызвать модификацию биологически важных молекул, ответственных за нормальное функционирование клетки.
- **Биохимические изменения** могут произойти как через несколько сек., так и через десятилетия после облучения и привести к гибели клеток, и патологическим изменениям в них.

# ВРЕМЕННЫЕ РАМКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАДИАЦИИ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ



# БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ И ДОЗА ИЗЛУЧЕНИЯ

Одинаковые дозы различных видов излучения обладают **разным** биологическим эффектом.

- **Типы тканей:**

одни части тела (органы, ткани) более чувствительны к ИИ, чем другие: например, при одинаковой эквивалентной дозе облучения возникновение рака в легких более вероятно, чем в щитовидной железе, а облучение половых желез особенно опасно из-за риска генетических повреждений. Поэтому дозы облучения органов и тканей также следует учитывать с разными коэффициентами.

- **Мощность дозы:**

темп облучения чрезвычайно важен; низкая доза в течение длительного периода наносит меньше ущерба, чем та же самая доза за короткое время; механизмы восстановления ДНК получают больше возможности для действия при низкой мощности дозы.

- **Тип излучения:**

энергия, переданная клетке на одном расстоянии сильно варьируется по типам излучения; энергии  $\gamma$ - и рентгеновского фотона передаются большему количеству клеток, тогда как практически вся энергия тяжелой  $\alpha$ -частицы переходит всего к одной клетке. Так, можно сказать, что линейная передача энергии для  $\alpha$ -и нейтронного излучения намного больше, чем для  $\beta$ -,  $\gamma$ -и рентгеновского излучения.

# ВЕСОВЫЕ МНОЖИТЕЛИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Вид излучения и диапазон энергий	Весовой множитель
Фотоны всех энергий	1 <sup>б</sup>
Электроны и мюоны всех энергий	1
Нейтроны с энергией < 10 КэВ	5
Нейтроны от 10 до 100 КэВ	10
Нейтроны от 100 КэВ до 2 МэВ	20
Нейтроны от 2 МэВ до 20 МэВ	10
Нейтроны > 20 МэВ	5
Протоны с энергий > 2 МэВ (кроме протонов отдачи)	5
альфа-частицы, осколки деления и другие тяжелые ядра	20

# ЭКВИВАЛЕНТНАЯ И ЭФФЕКТИВНАЯ ДОЗА

- При одинаковой поглощенной дозе воздействие разных видов излучения может сильно отличаться. Чтобы это учесть, значение поглощенной дозы умножают на **коэффициент качества излучения**, отражающий способность излучения данного вида повреждать ткани организма. По этому качеству  $\alpha$ -излучение, например, в двадцать раз опаснее  $\gamma$ -излучения. Пересчитанную дозу называют **эквивалентной**. Ее измеряют в системе СИ зивертах (Зв),  $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг}$  для  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучения и  $0,05 \text{ Дж/кг}$  для  $\alpha$ -излучений. Для измерения эквивалентной дозы используется также единица, называемая бэр — расшифровывается как "биологический эквивалент рентгена"  $1 = 0,01 \text{ Зв}$ .
- Коэффициент качества излучения показывает, во сколько раз эффективность биологического воздействия данного вида излучения больше воздействия гамма-излучения при одинаковой поглощенной дозе в тканях. При хроническом облучении всего тела коэффициент качества для рентгеновского бета- и гамма-излучения равен 1, для протонов с энергией меньше 10 МэВ и нейтронов с энергией  $0,1 \dots 10 \text{ МэВ}$   $k = 10$ ; для электронов с энергией меньше 80 кэВ  $k = 3$ ; для альфа-частиц с энергией меньше 10 МэВ  $k = 20$ . Символ  $H_T$  используется для эквивалентной дозы в определенном органе.

$$H_T = \sum w_R \cdot D_{T,R}$$

где  $H_T$  — эквивалентная доза в органе Т (Зв);  $w_R$  — весовой коэффициент для типа излучения;  $D_{T,R}$  — поглощенная доза в органе Т от излучения R (Гр)

# ЭКВИВАЛЕНТНАЯ И ЭФФЕКТИВНАЯ ДОЗА

В случае облучения несколькими типами излучений

$$H_T = \sum_R W_R \times D_{T,R}$$

- По умолчанию, а также для  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения  $W_R = 1$  и поглощенная доза может непосредственно приравниваться эквивалентной.
- Так как весовой фактор – величина безразмерная,  $D$  и  $H$  выражены в Дж/кг. Однако  $D$  – физическое количество (поглощенная доза энергии), и  $H$  – биологическое количество (мера повреждения). Чтобы быть в состоянии различить хорошо эти количества, поглощенная доза ( $D$ ) выражена в Гр $\ddot{a}$ ях (Гр), а эквивалентная доза ( $H$ ) – в Зивертах (Зв).

# ЭКВИВАЛЕНТНАЯ И ЭФФЕКТИВНАЯ ДОЗА

Влияние облучения носит **неравномерный** характер. Для оценки ущерба здоровью человека за счет различного характера влияния облучения на разные органы (в условиях равномерного облучения всего тела) введено понятие **эффективной эквивалентной дозы  $E_{эфф}$**  применяемое при оценке возможных стохастических эффектов - злокачественных новообразований. Эффективная доза равна сумме взвешенных эквивалентных доз во всех органах и тканях:

$$E_{эфф} = \sum_t w_t H_t$$

где  $w_t$  - тканевый весовой множитель, а  $H_t$  - эквивалентная доза, поглощенная в ткани -  $t$ . Единица эффективной эквивалентной дозы - Зиверт.

# ЗНАЧЕНИЯ ТКАНЕВЫХ ВЕСОВЫХ МНОЖИТЕЛЕЙ

ТКАНИ И ОРГАНЫ	$W_T$
Гонады (половые железы)	0,20
Костный мозг (красный)	0,12
Толстый кишечник	0,12
Легкие	0,12
Желудок	0,12
Мочевой пузырь	0,05
Грудная железа	0,05
Печень	0,05
Пищевод	0,05
Щитовидная железа	0,05
Кожа	0,01
Клетки костных поверхностей	0,01
Остальное	0,05