Часть 2

Радиационная Физика

ЦЕЛЬ

Знакомство с основами радиационной физики, дозиметрическими величинами и единицами, необходимых для выполнения расчетов, а также с различными видами детекторов излучения, их характеристиками, принципами работы и ограничениями.

Содержание

- Структура атома
- Радиоактивный распад
- Производство радионуклидов
- Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом
- Радиационные величины и единицыРадиационные величины и единицы
- Детекторы излучения

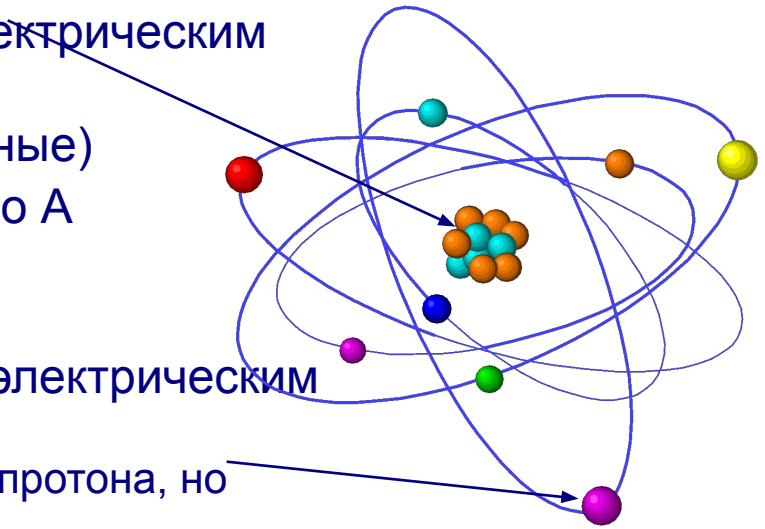
Примечание: радиационные единицы и величины находятся в фазе выработки консенсуса между МКРЕ и МАГАТЭ. Возможны изменения которые необходимо будет включить в этот документ.

Часть 2. Радиационная Физика

2.1. Структура атома

АТОМ

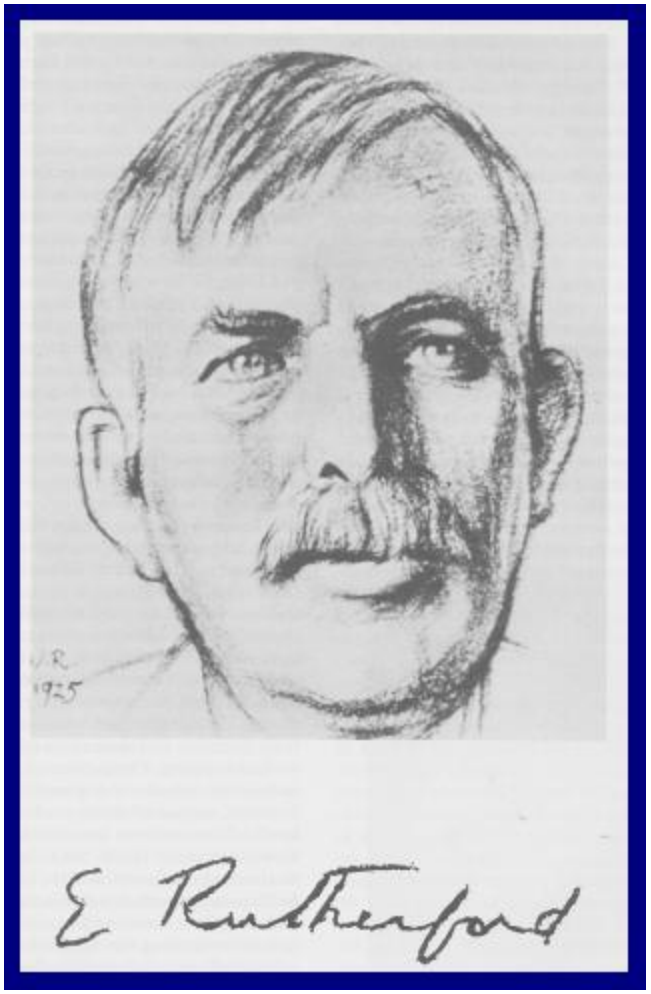
- Строение атома
  - протоны и нейтроны = нуклоны
  - Z протонов с положительным электрическим зарядом ($1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл)
  - нейтроны без заряда (нейтральные)
  - число нуклонов = массовое число A
- Внеядерная структура
  - Z электронов (легкие частицы с электрическим зарядом)
    - Заряд электрона равен заряду протона, но отрицательный



Символ Частицы		Масса (кг)	Энергия (МэВ)	Заряд
Протон	p	$1.672*10^{-27}$	938.2	+
Нейтрон	n	$1.675*10^{-27}$	939.2	0
Электрон	e	$0.911*10^{-30}$	0.511	-

Определение: Изотоп

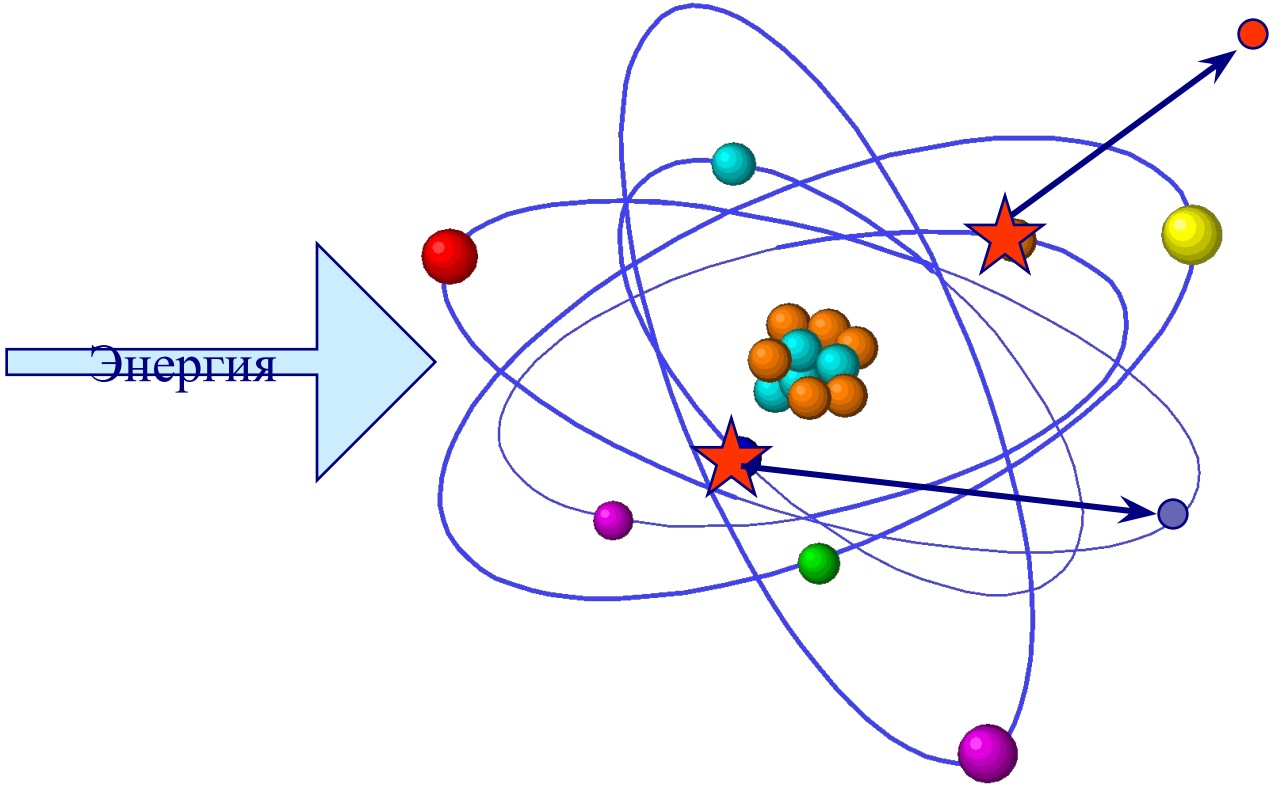
Эрнест Резерфорд (1871-1937)



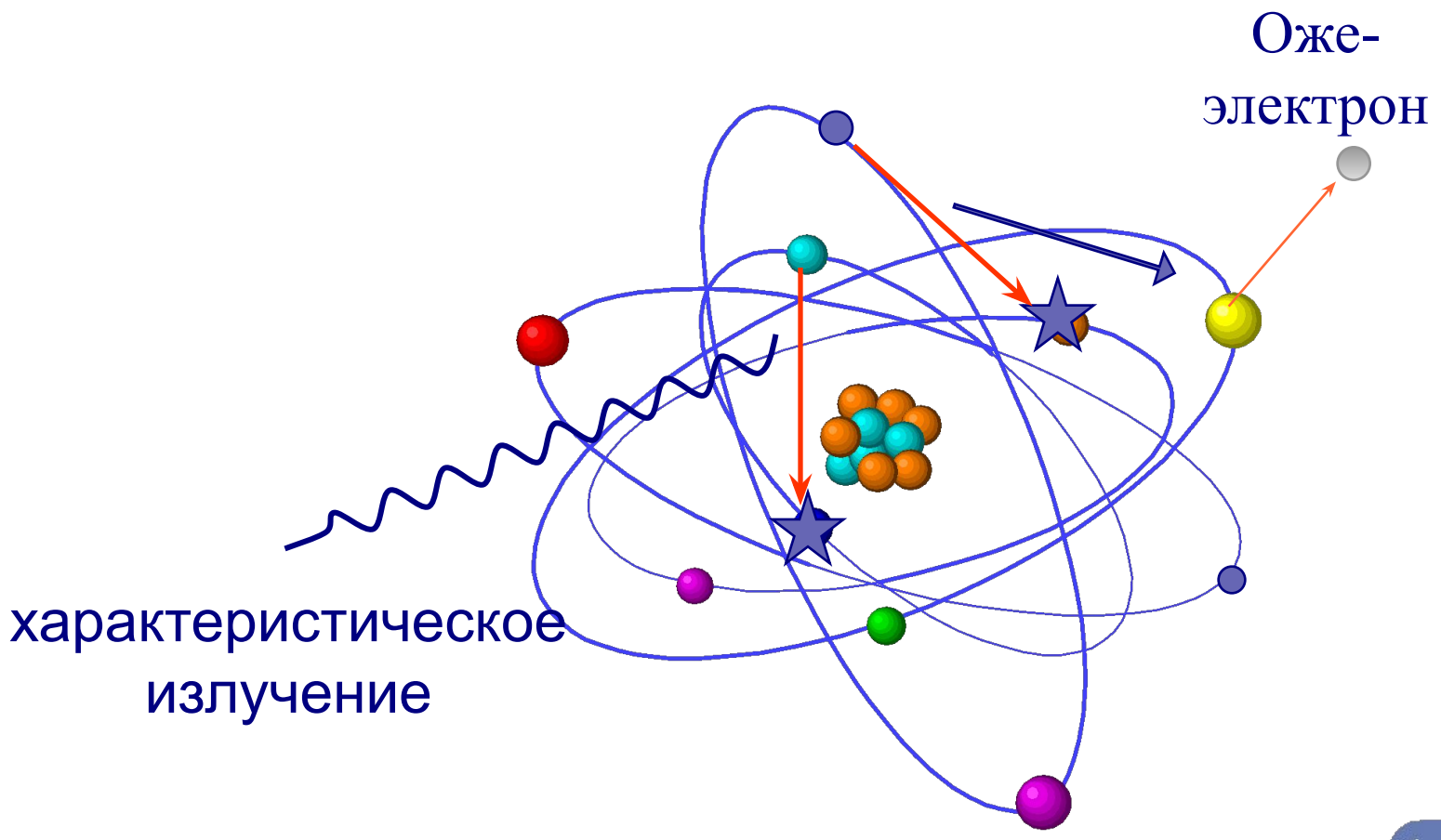
ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЭЛЕКТРОНА

- Электроны могут иметь только дискретные энергетические уровни
- Чтобы удалить электрон из своей оболочки надо приложить энергию, E,которая больше или равна энергия связи электрона
- Дискретные оболочки вокруг ядра: K, L, M, …
- K-оболочка имеет максимальную энергию (т.е., наиболее устойчивая)
- Энергия связи уменьшается при увеличении Z
- Максимальное число электронов в каждой оболочке: 2 в K, 8 в L-оболочке, …

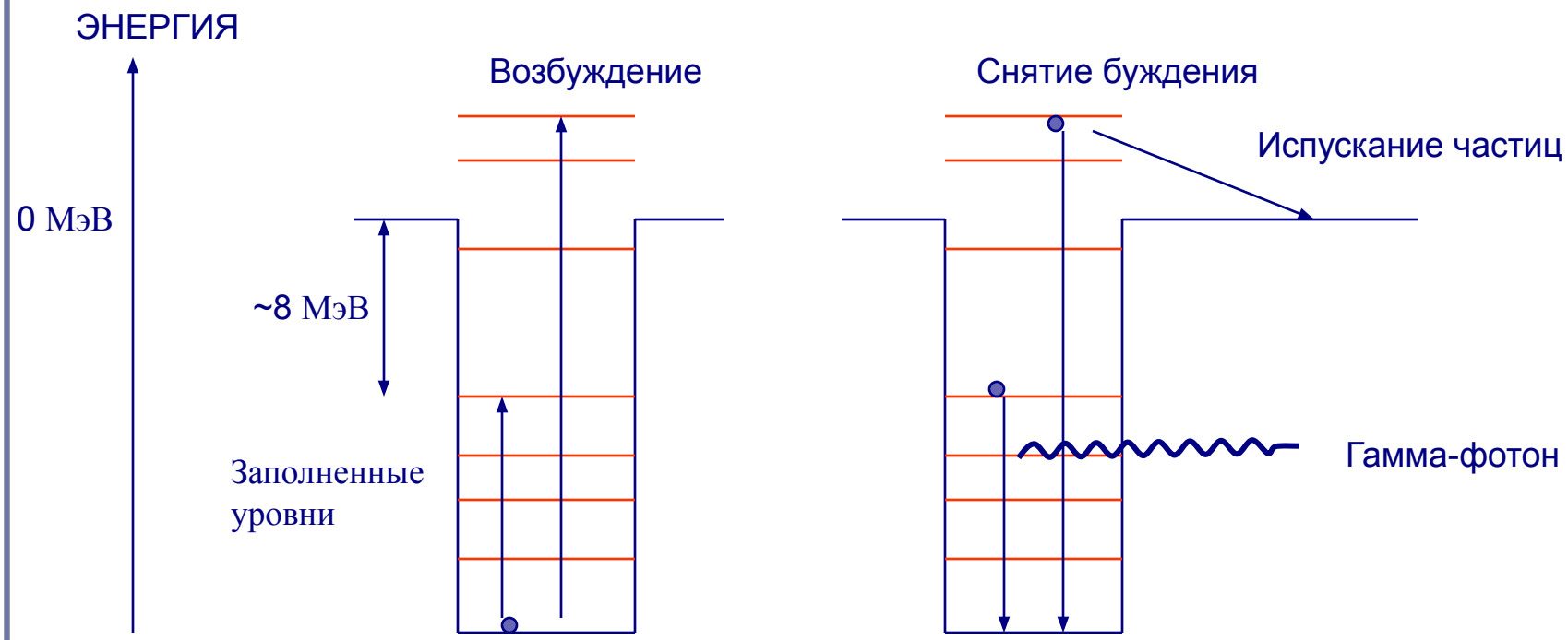
ИОНИЗАЦИЯ-ВОЗБУЖДЕНИЕ



СНЯТИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ



УРОВНИ ЭНЕРГИИ ЯДРА

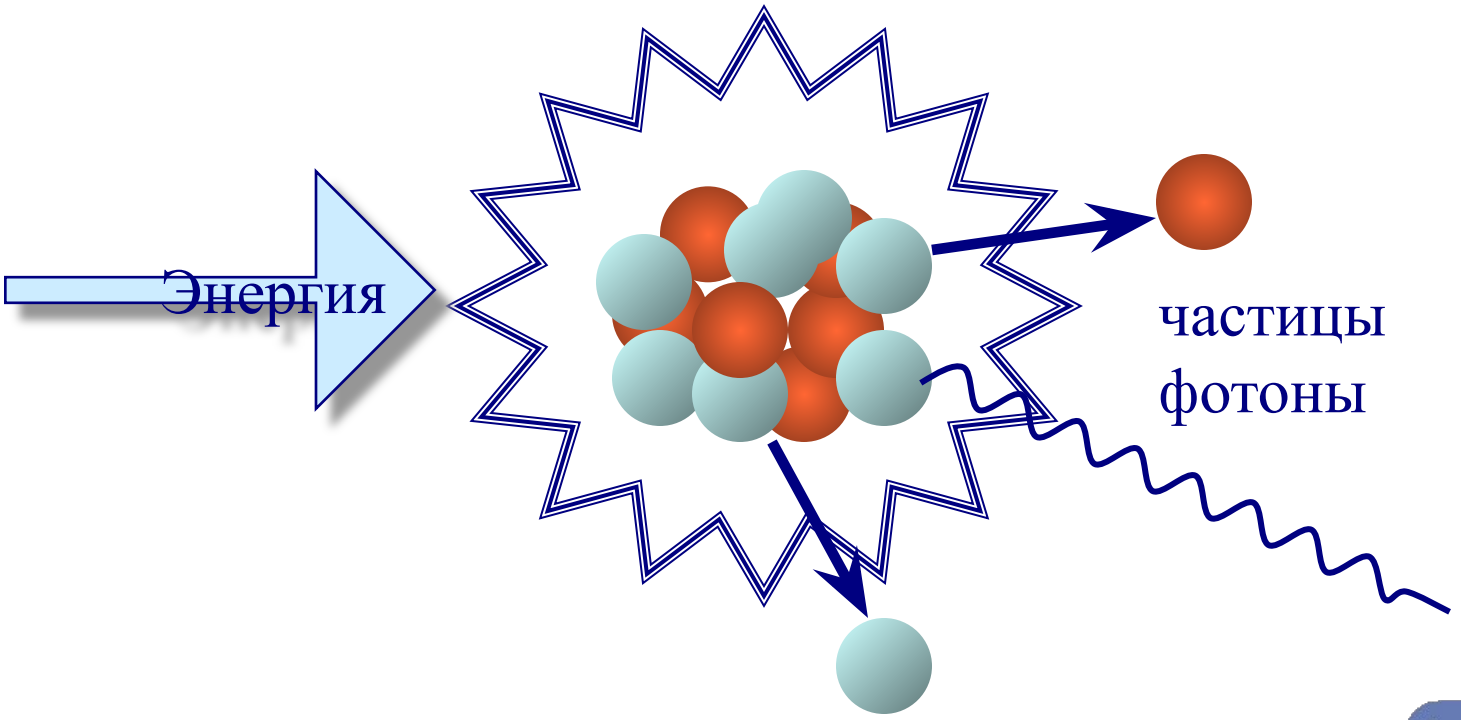


Нуклоны могут занимать различные энергетические уровни и ядро может находиться либо в основном состоянии, либо в возбужденном состоянии. Возбужденное состояние может быть достигнуто путем передачи дополнительной энергии ядру. При снятии возбуждения, ядро излучает избыток энергии испуская частицы или электромагнитное излучение. В этом случае электромагнитное излучение называется гамма-излучением. Энергия гамма-излучения - это разница энергий между различными энергетическими уровнями ядра.

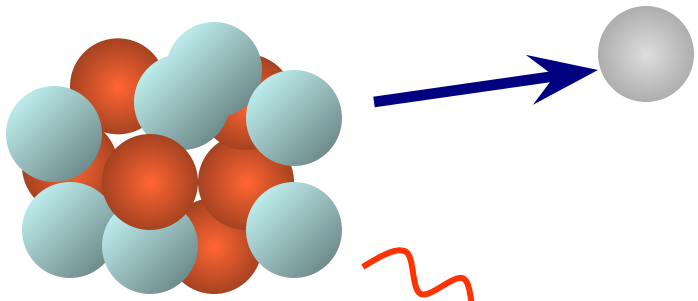
ИЗОМЕРНЫЙ ПЕРЕХОД

Обычно возбужденное ядро переходит в основное состояние в течение пикосекунд. В некоторых случаях, однако, среднее время пребывания ядра в возбужденном состоянии вполне измеримо. Снятие возбуждения такого состояния ядра называется изомерным переходом (ИП). Это свойство ядра отмечается добавлением буквы m в знаке нуклида: технеций-99m, Tc-99m или 99mTc.

ВОЗБУЖДЕНИЕ ЯДРА



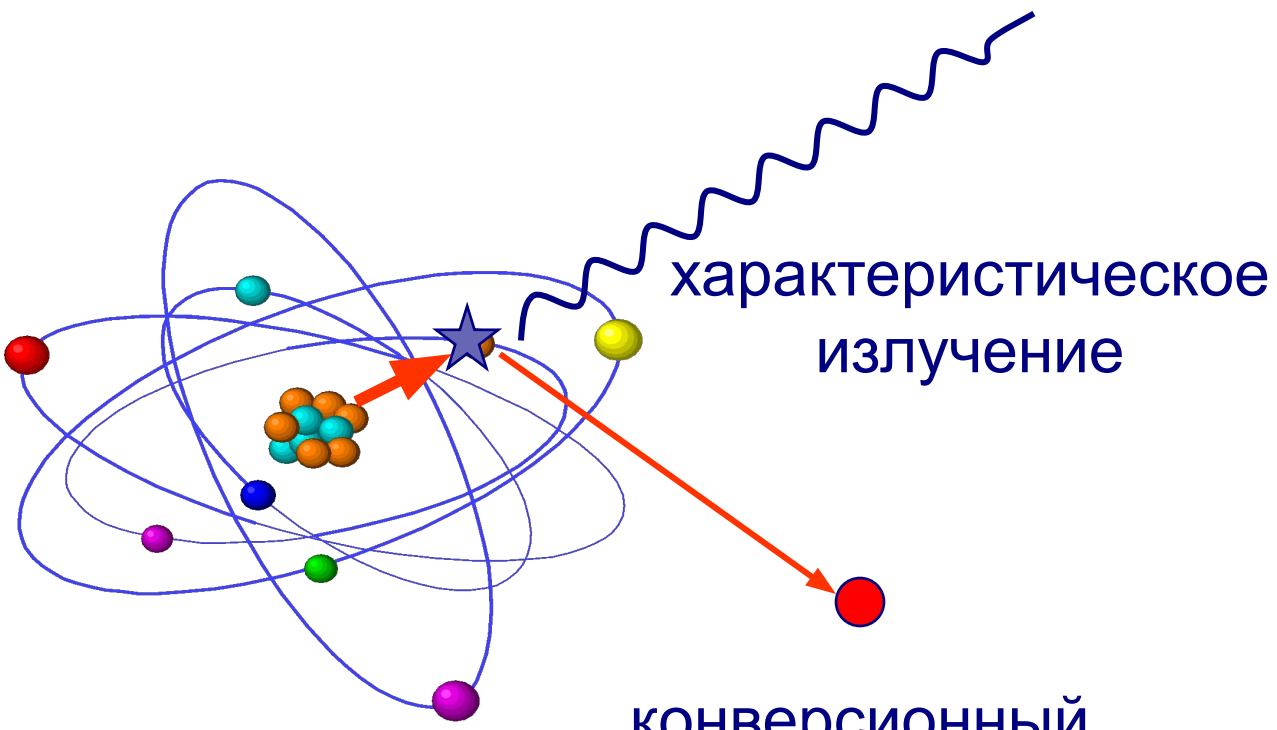
СНЯТИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЯДРА



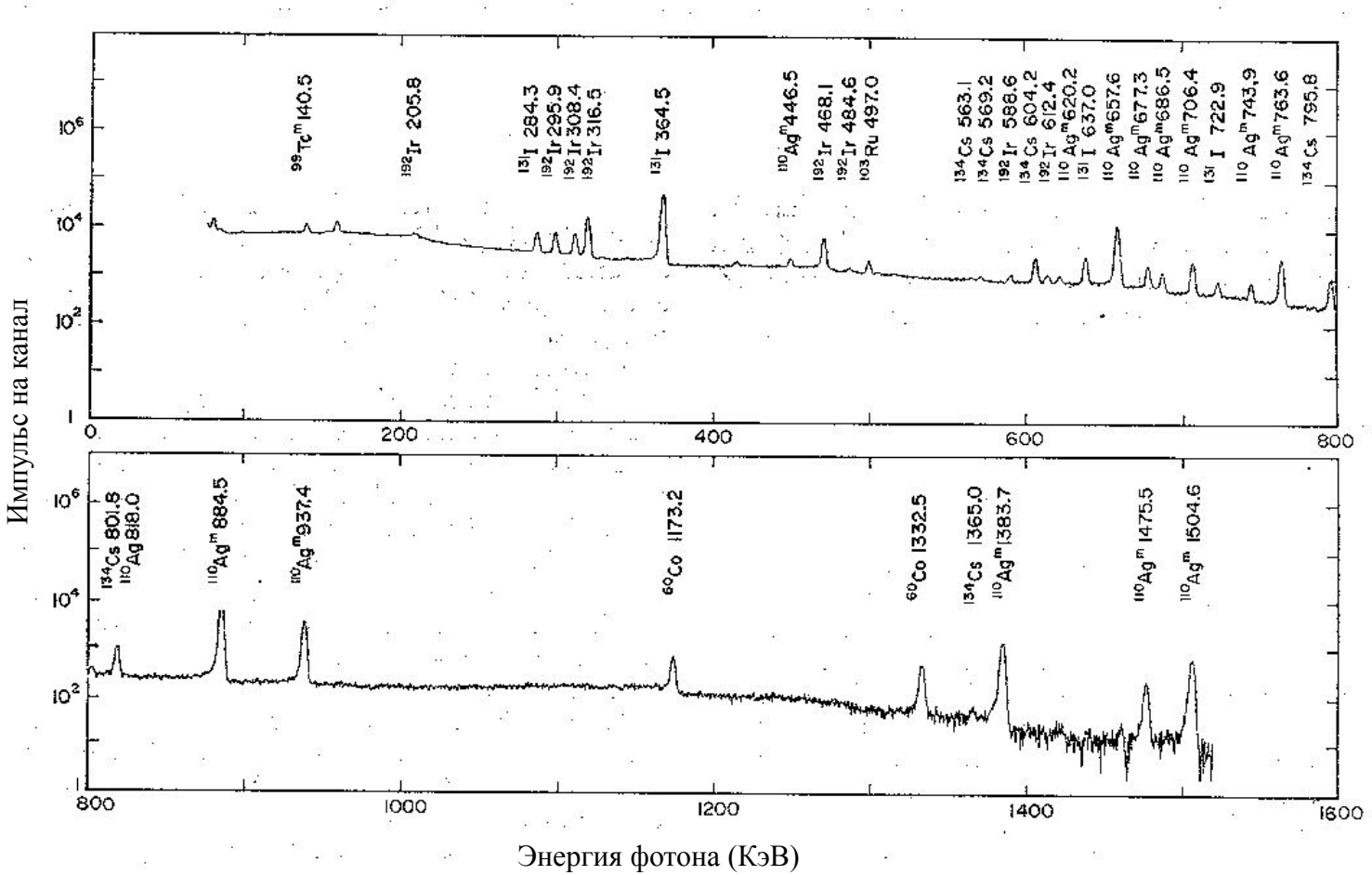
альфа-частицы
бета-частицы

Гамма-излучение

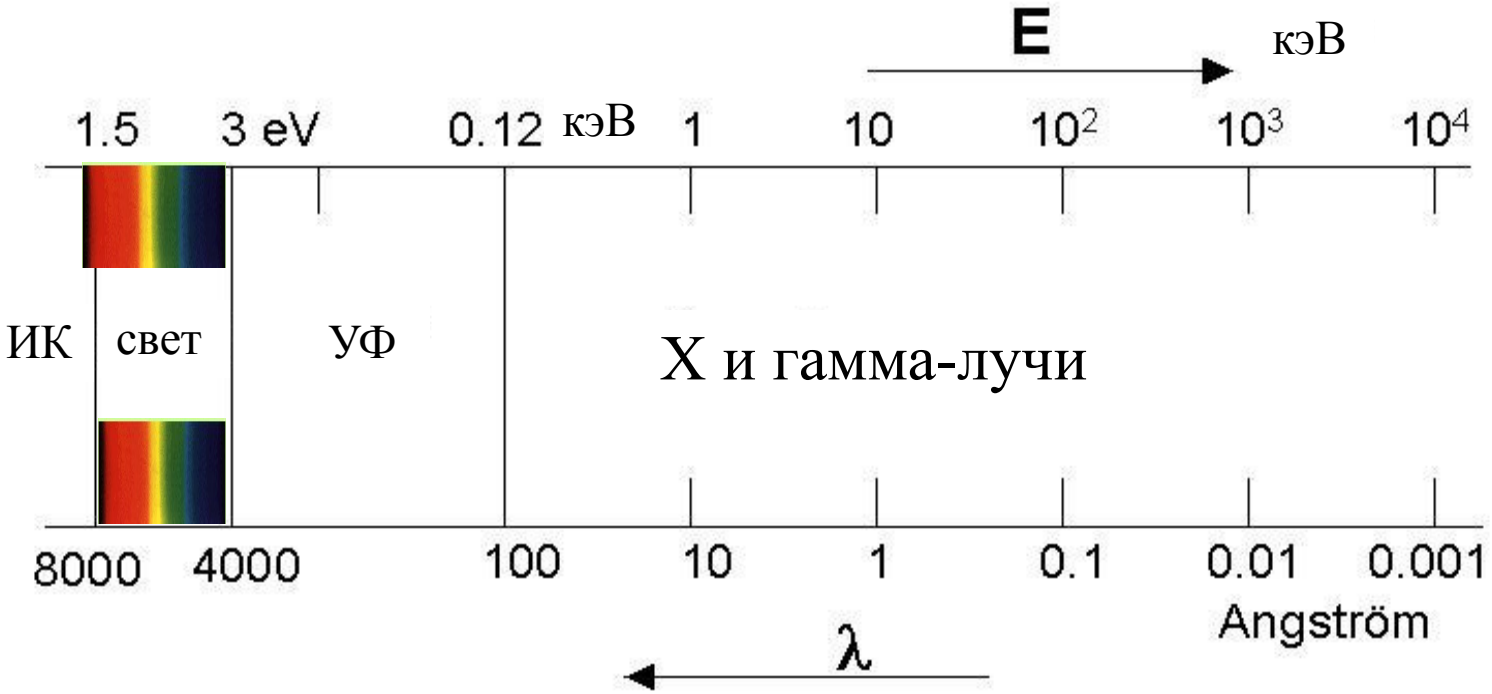
ВНУТРЕННЯЯ КОНВЕРСИЯ



Гамма-спектр
(характеристика ядра)



Фотоны являются частью электромагнитного спектра



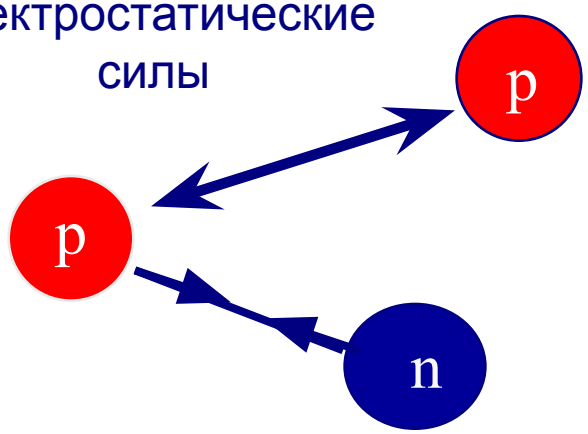
ИК: инфракрасный, УФ: ультрафиолетовый

Часть 2. Радиационная Физика

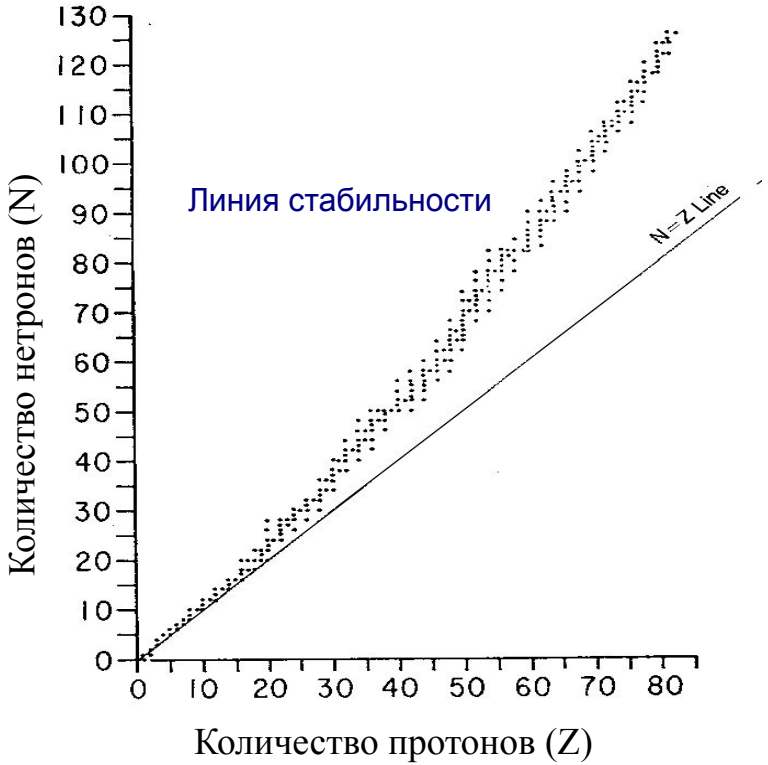
2.2. Радиоактивный распад

СТАБИЛЬНЫЕ ЯДРА

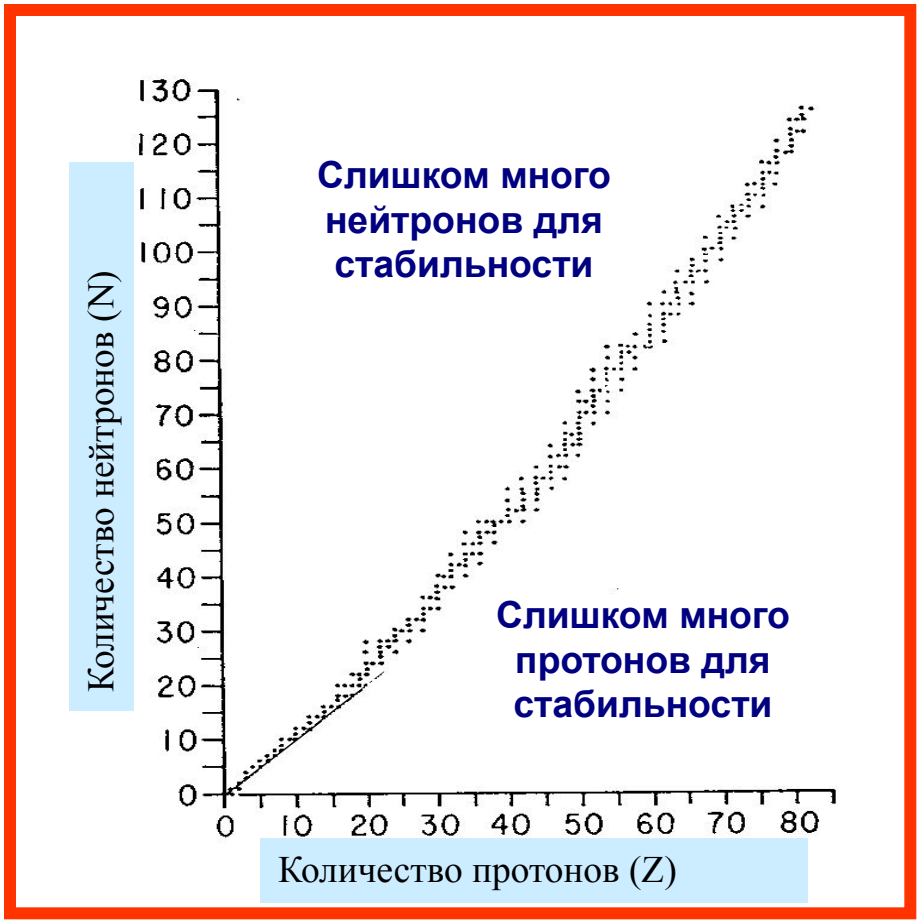
дальнедействующие электростатические силы



короткодействующие ядерные силы



Стабильные и нестабильные ядра



РАДИОАКТИВНЫЙ РАСПАД

Расщепление

Ядро делится на две части - продукты распада, и 3-4 нейтрона.
Например: Cf-252 (спонтанный), U-235 (вынужденный)

α-распад

Ядро испускает α-частицы (He-4). Примеры: Ra-226, Rn-222

$$^{226}_{86}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{84}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\alpha$$

β-распад

Слишком много нейтронов приводит к β^- -распаду. **$n \Rightarrow p^+ + e^- + \nu$**.
Пример:H-3, C-14, I-131.
Слишком много протонов приводит к β^+ -распаду
$p^+ \Rightarrow n + e^+ + \nu$
Примеры: O-16, F-18
или к электронному захвату (ЭЗ).
$p^+ + e^- \Rightarrow n + \nu$
Примеры: I-125, Tl-201

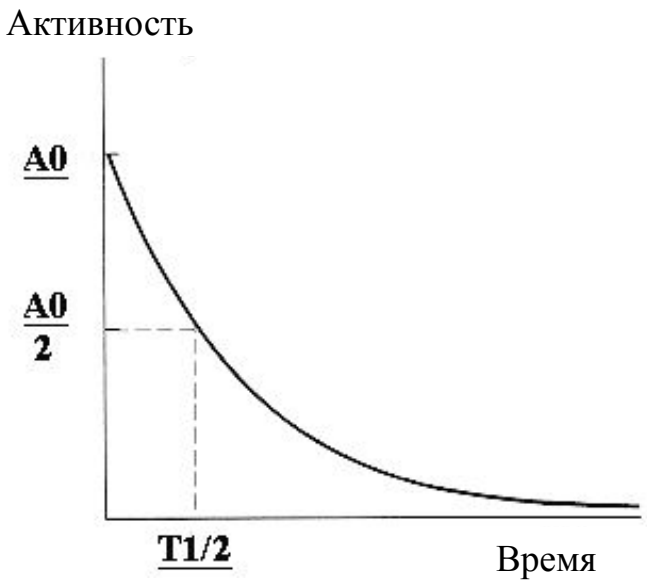
РАДИОАКТИВНЫЙ РАСПАД

Никогда неизвестно в какое время определенное радиоактивное ядро распадется. Однако можно определить вероятность того, что оно распадется в определенное время. В образце содержащим N ядер, число распадов в единицу времени:

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

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

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



АКТИВНОСТЬ

Активность –
количество ядер, распадающихся в единицу времени

Единица активности
1 Бк (Беккерель) = 1 распад в секунду

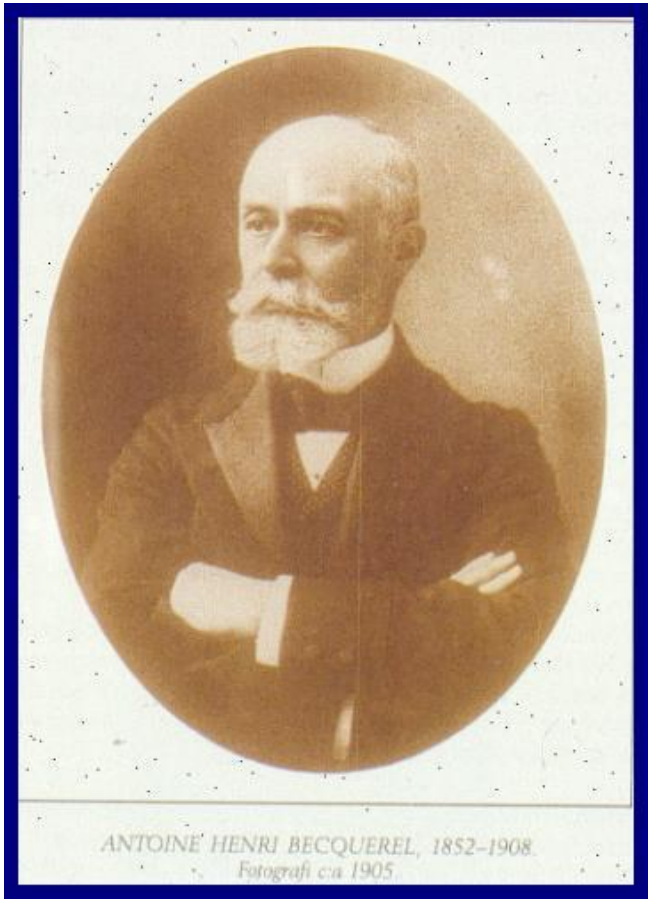
1 Бк - маленькая величина

- В теле содержится 3000 Бк естественной активности
- 20 000 000-1000 000 000 Бк в процедурах ядерной медицины

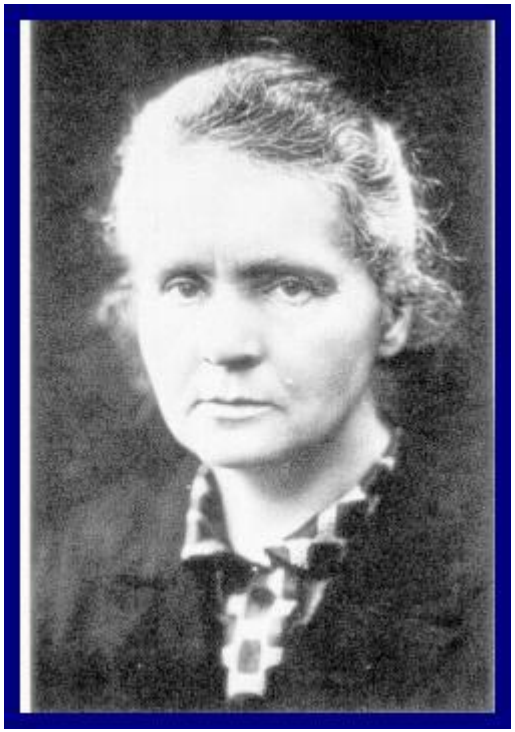
Множители и приставки (Активность)

Множители	Приставки	Сокращения
1	-	Бк
1 000 000	Мега- (M)	МБк
1 000 000 000	Гига- (G)	ГБк
1 000 000 000 000	Тера- (T)	ТБк

Анри Беккерель 1852-1908



Мария Кюри 1867-1934

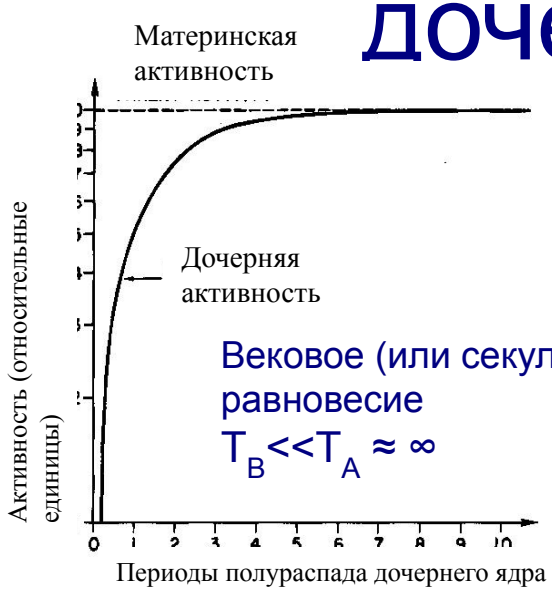


Распад материнского и дочернего ядер

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda 1 \cdot t}$$

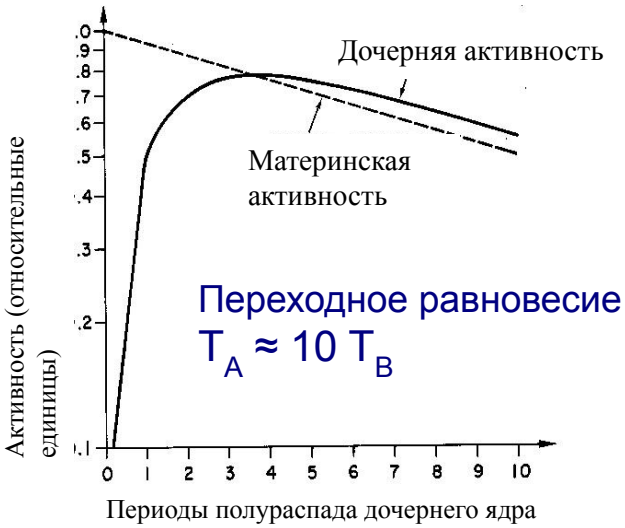
$$B(t) = \frac{A_0 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}\left(e^{-\lambda_1 \cdot t} - e^{-\lambda_2 \cdot t}\right)$$

Распад материнского и дочернего ядер



Вековое (или секулярное) равновесие

$T_B << T_A \approx \infty$



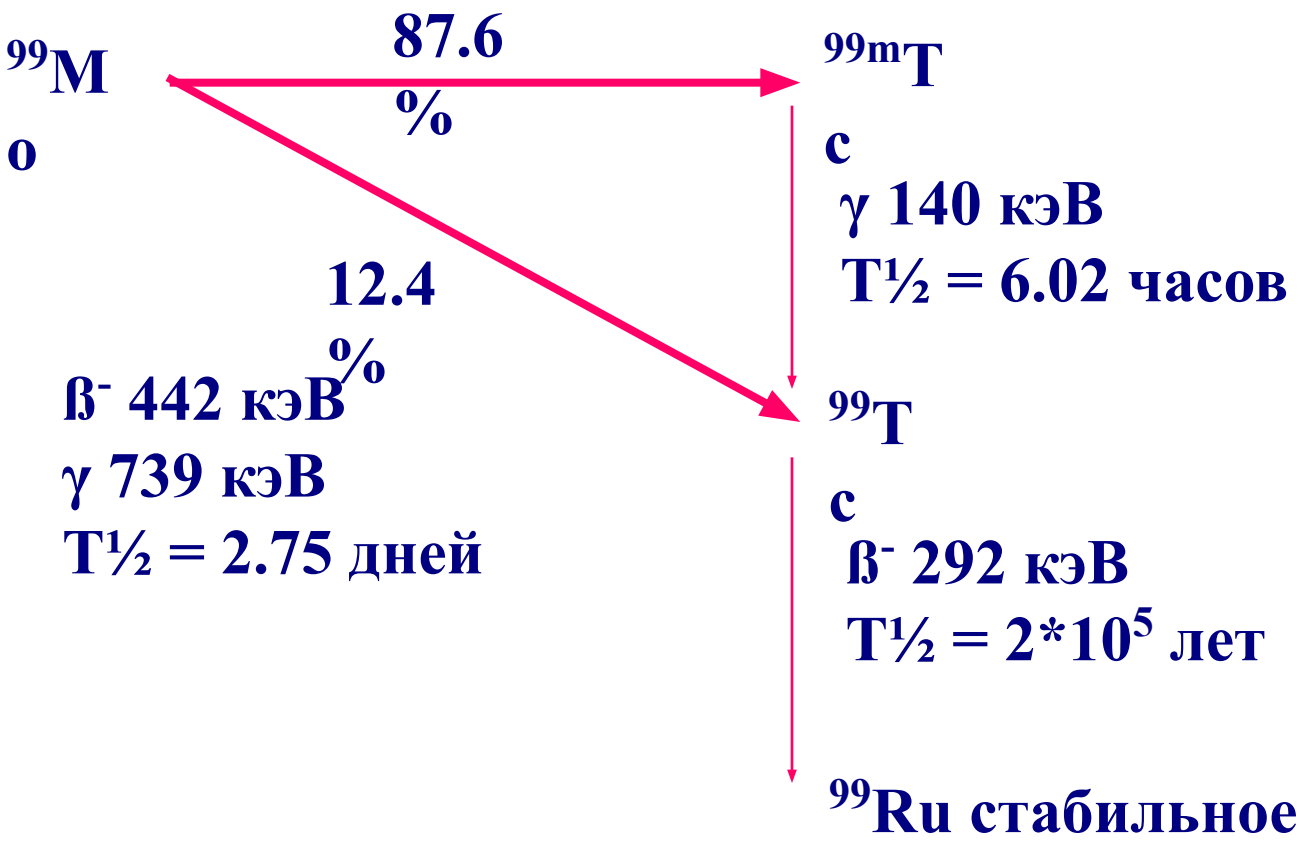
Переходное равновесие

$T_A \approx 10\ T_B$

Нет равновесия

$T_A \approx 1/10\ T_B$

^{99}Mo-^{99m}Tc


99M
o
87.6
%
99mT
c
γ 140 кэВ
T½ = 6.02 часов
12.4
%
ß- 442 кэВ
γ 739 кэВ
T½ = 2.75 дней
99T
c
ß- 292 кэВ
T½ = 2*10^5 лет
99Ru стабильное

Ире́н Кюри́ (1897-1956)
и
Фредерик Жолио (1900-1958)

Часть 2. Радиационная Физика

2.4. Взаимодействие ионизирующего излучения м веществом

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Заряженные частицы

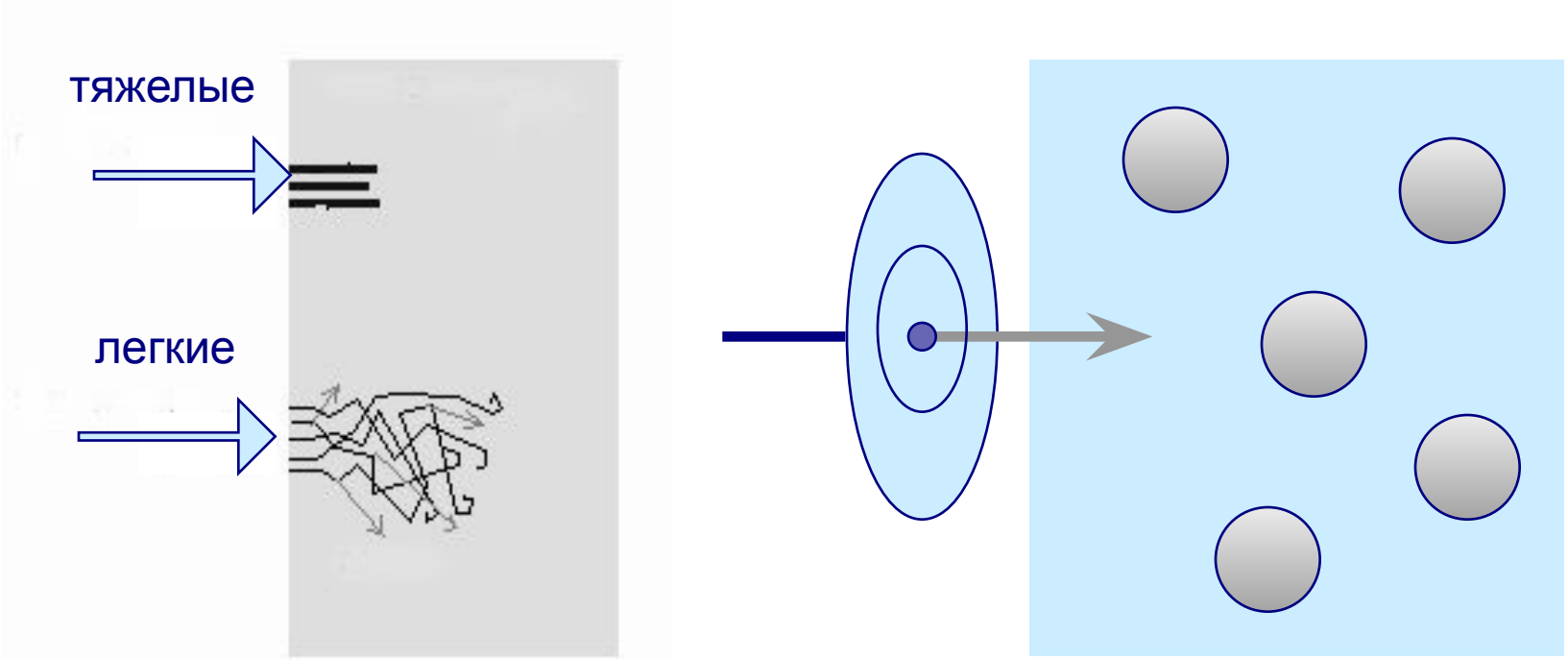
- альфа-частицы
- бета-частицы
- протоны

Незаряженные частицы

- фотоны (гамма- и рентгеновское излучения)
- нейтроны

Каждая отдельная частица может привести к ионизации, прямо или косвенно

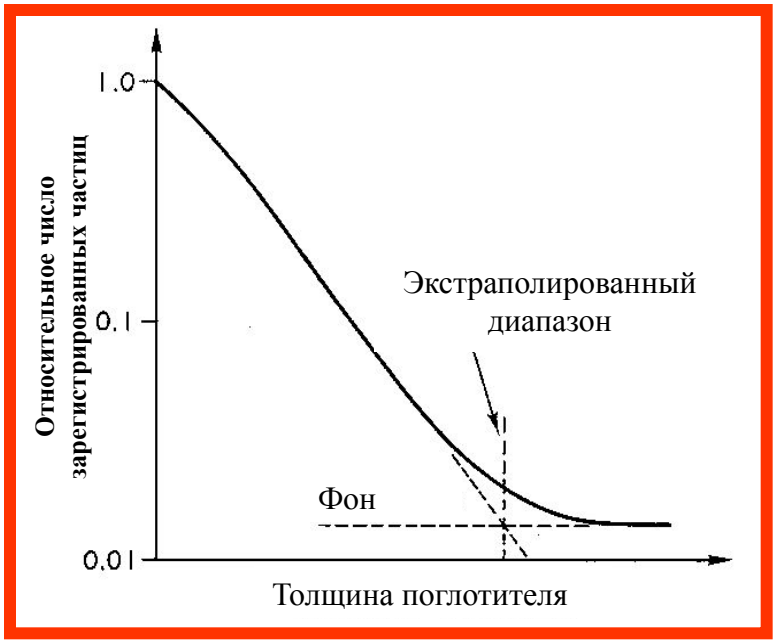
Взаимодействие заряженных частиц с веществом



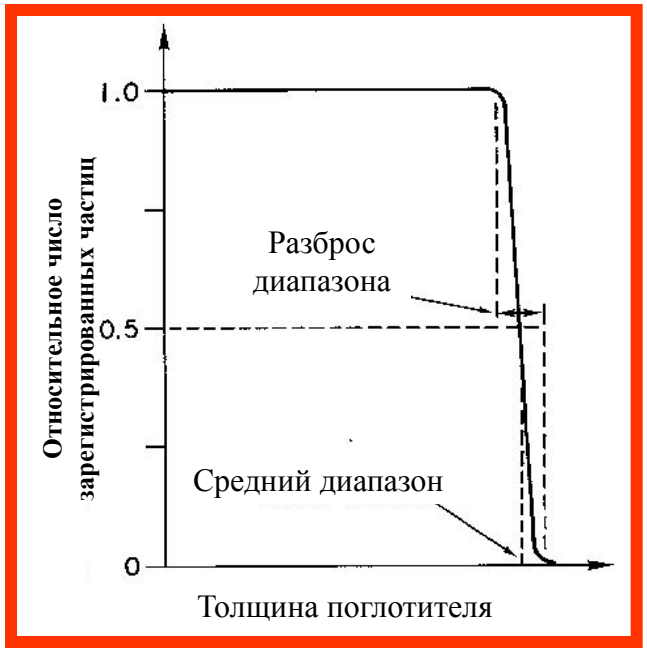
Макроскопически

Микроскопически

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ВЕЩЕСТВОМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

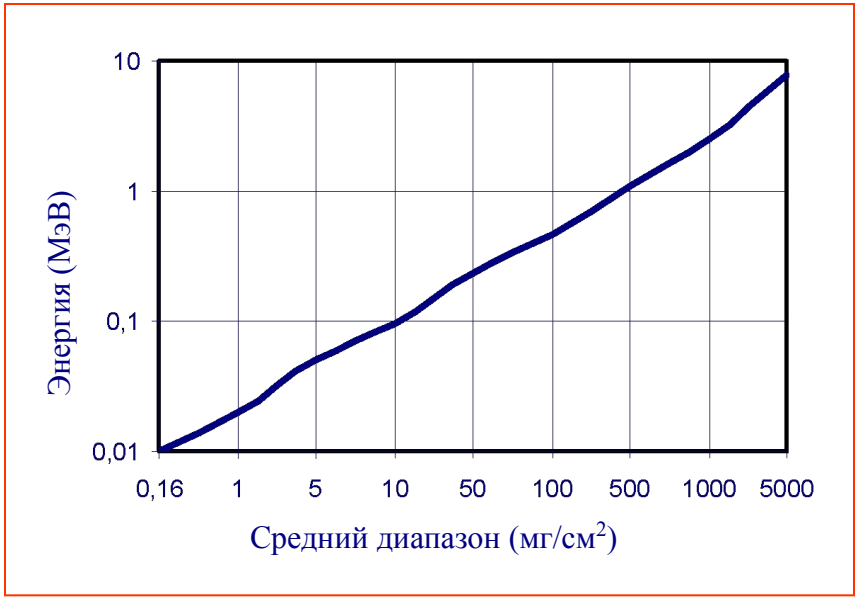


Бета-частицы



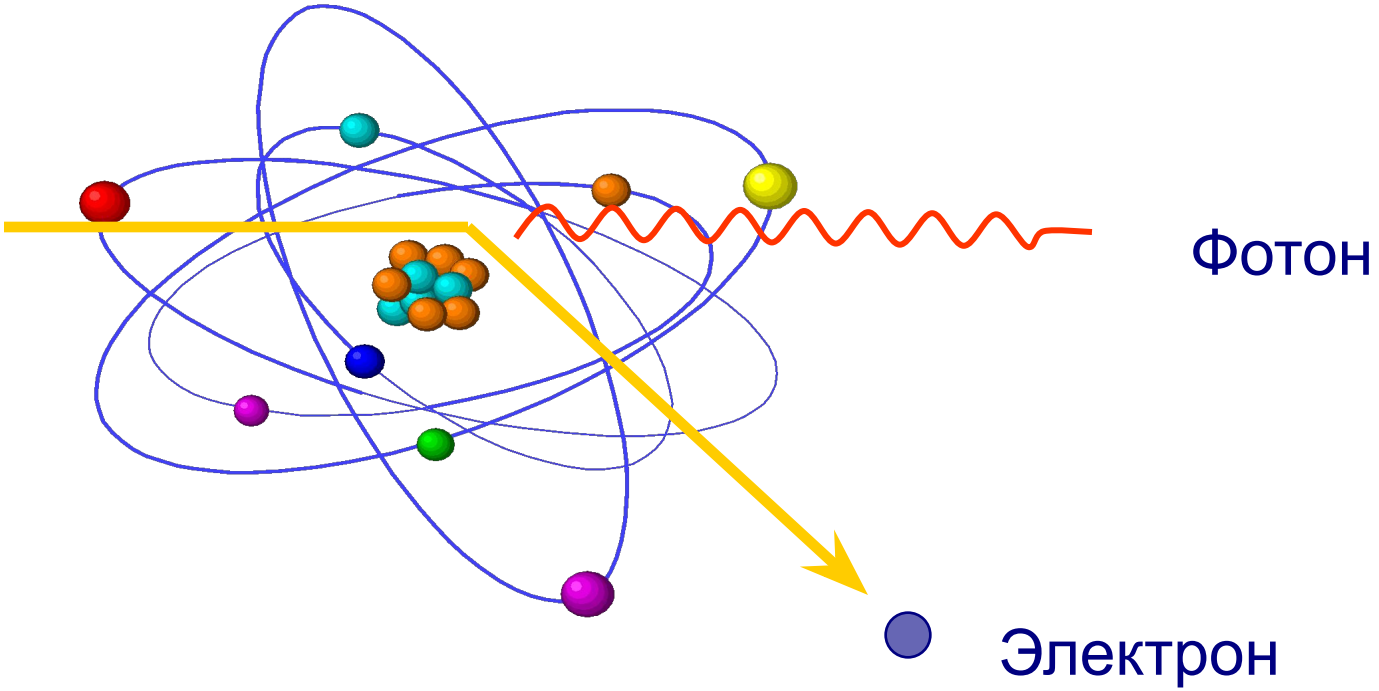
Альфа-частицы

Средний пробег β-частиц



Радионуклид	Макс энергия (кэВ)	Пробег (см) в воздухе	воде	алюминии
H-3	18.6	4.6	0.0005	0.00022
C-14	156	22.4	0.029	0.011
P-32	1700	610	0.79	0.29

Тормозное излучение

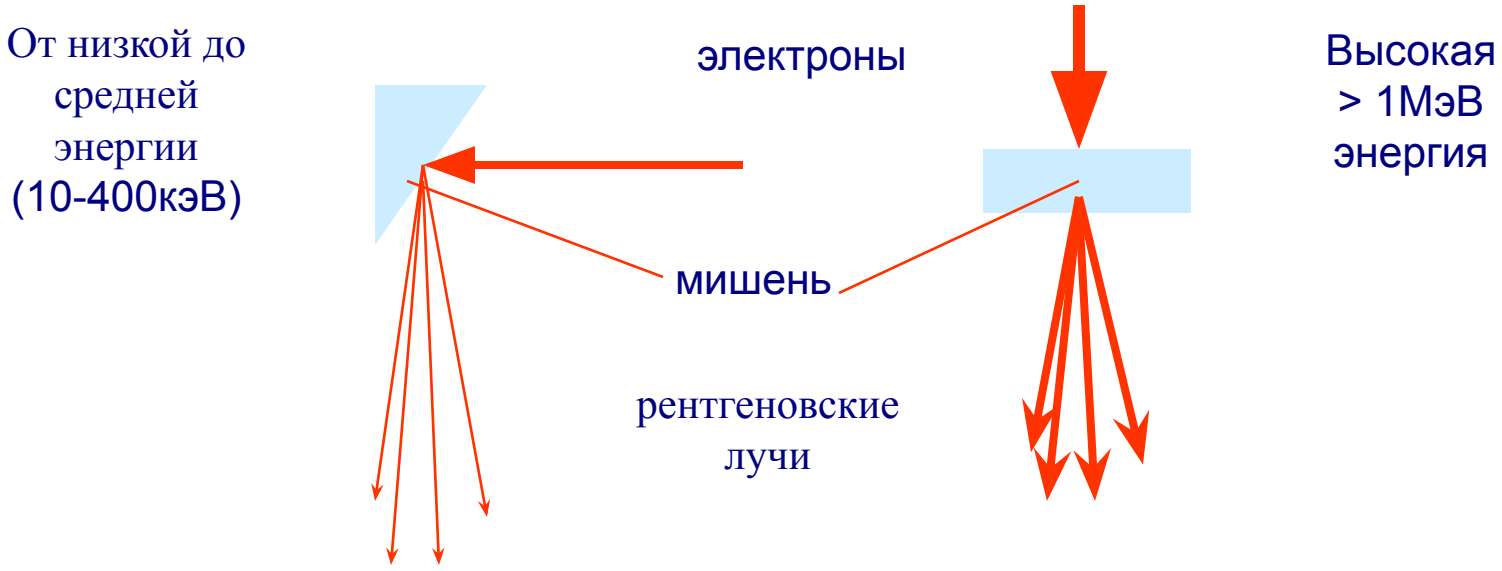


Получение тормозного излучения

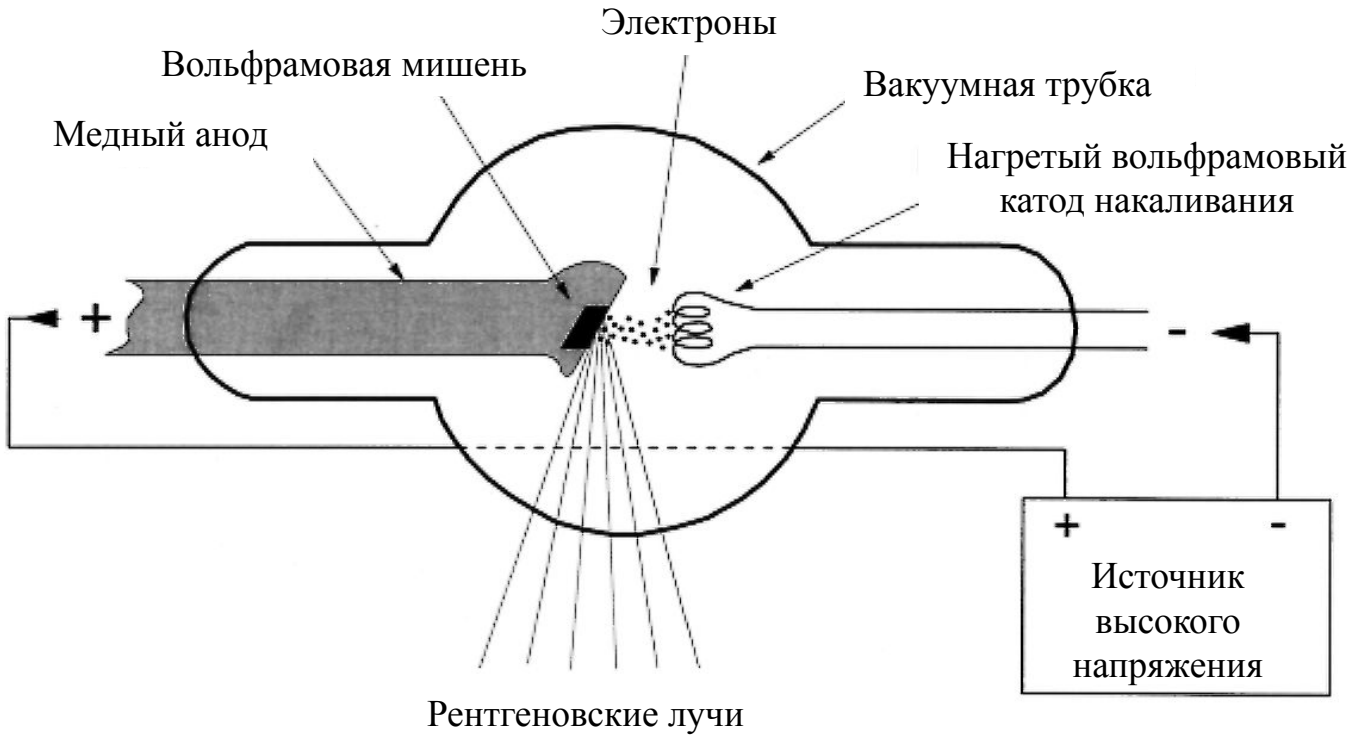
- Чем выше атомный номер материала мишени, на которую падают электроны, тем выше интенсивность рентгеновских лучей
- Чем выше энергия падающего электрона, тем больше вероятность возникновения рентгеновского излучения
- При любой энергии электрона, вероятность генерации рентгеновского излучения уменьшается с увеличением энергии рентгеновского излучения

Создание рентгеновского излучения

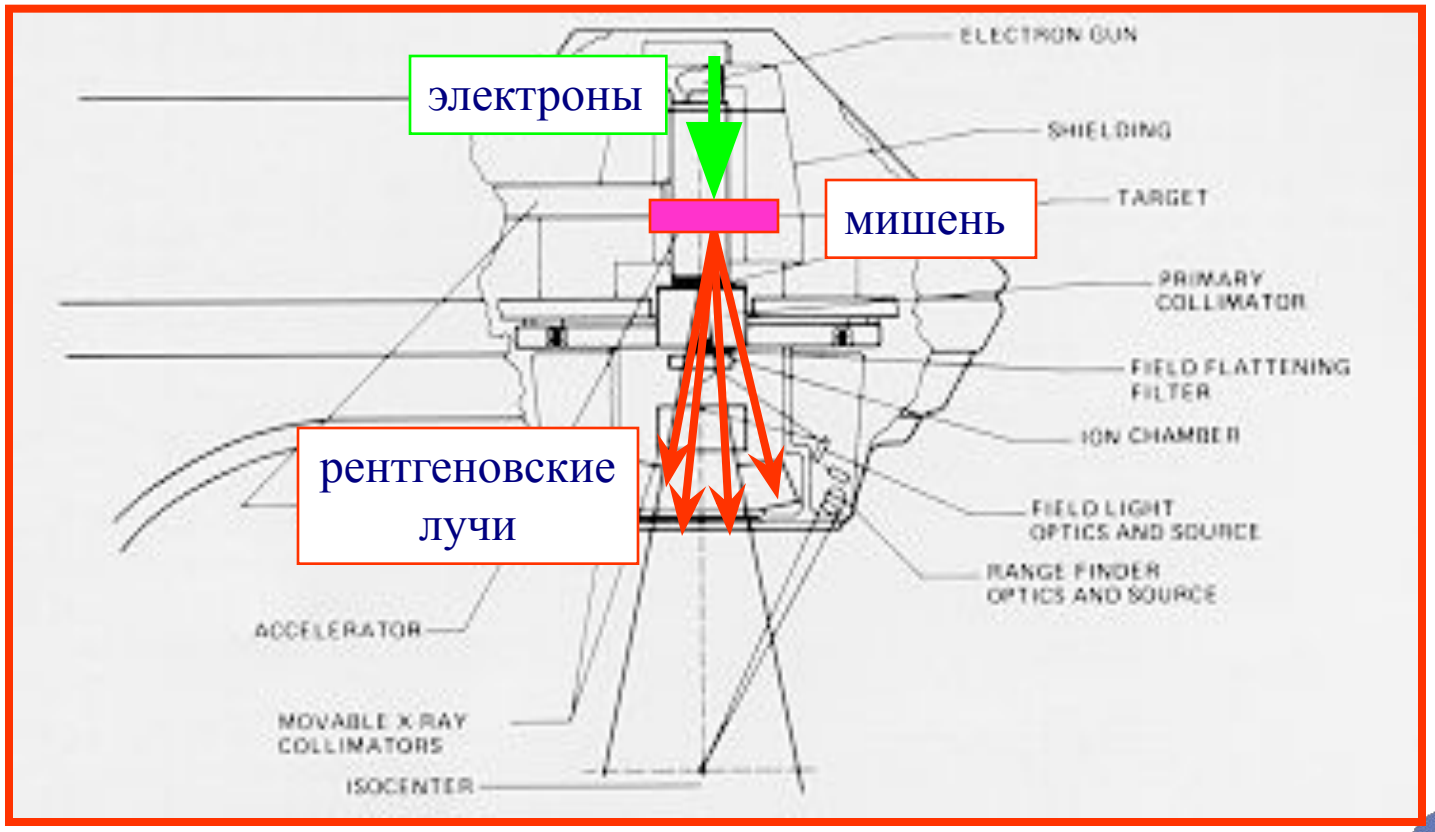
- Электроны с высокой энергией попадают в (металлическую) мишень, где часть их энергии преобразуется в излучение



Рентгеновская трубка для создания рентгеновского излучения низкой и средней энергий



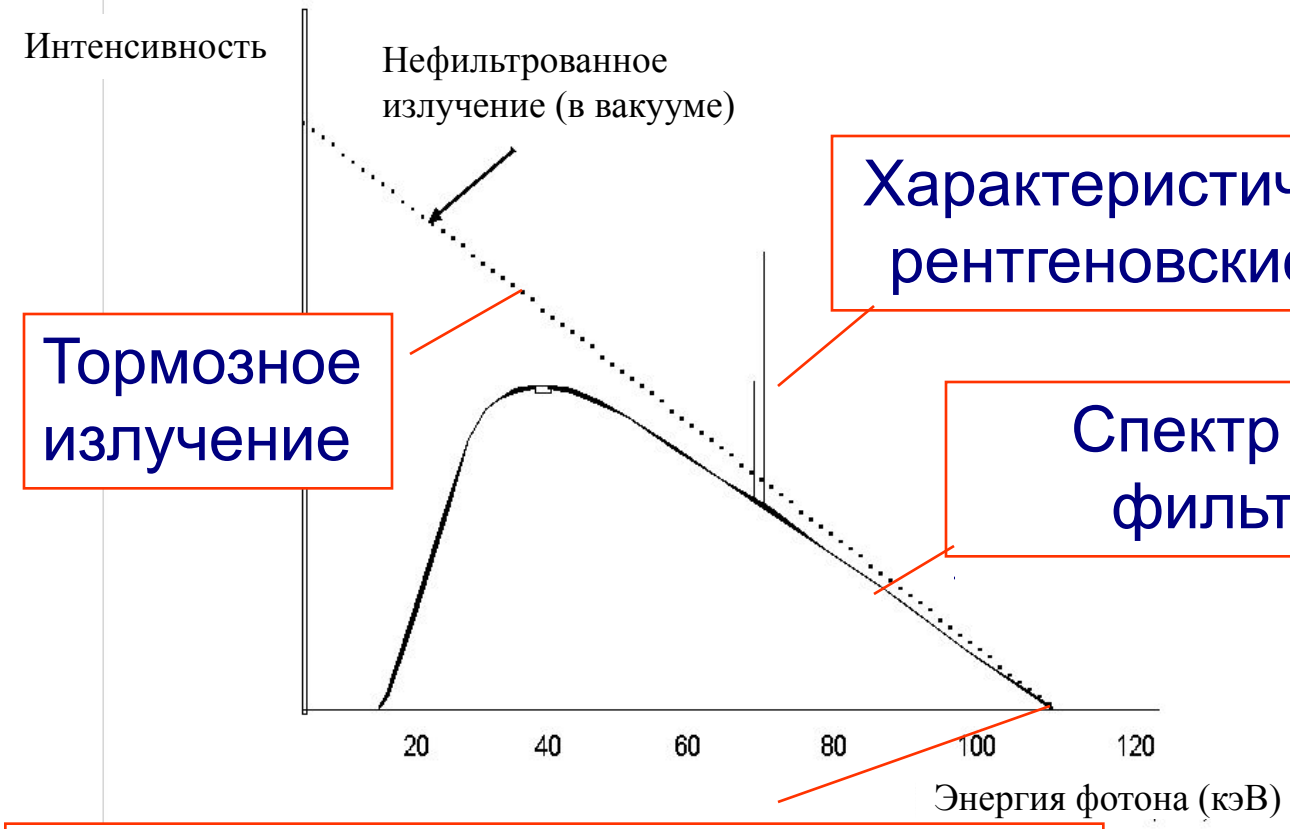
Линейный ускоритель для получения рентгеновских лучей высокой энергии



Проблемы с получением рентгеновского излучения

- **Угловое распределение:** фотоны рентгеновского излучения высокой энергии в основном направлены вперед, в то время как фотоны низкой энергии в основном испускаются перпендикулярно пучку падающих на мишень электронов
- **Эффективность получения**: в общем, чем выше энергия, тем выше эффективность получения рентгеновского излучения. Это означает, что при низких энергиях, большая часть энергии электронов (>98%) преобразуется в тепло – необходимо охлаждение мишени

Получающийся рентгеновский спектр



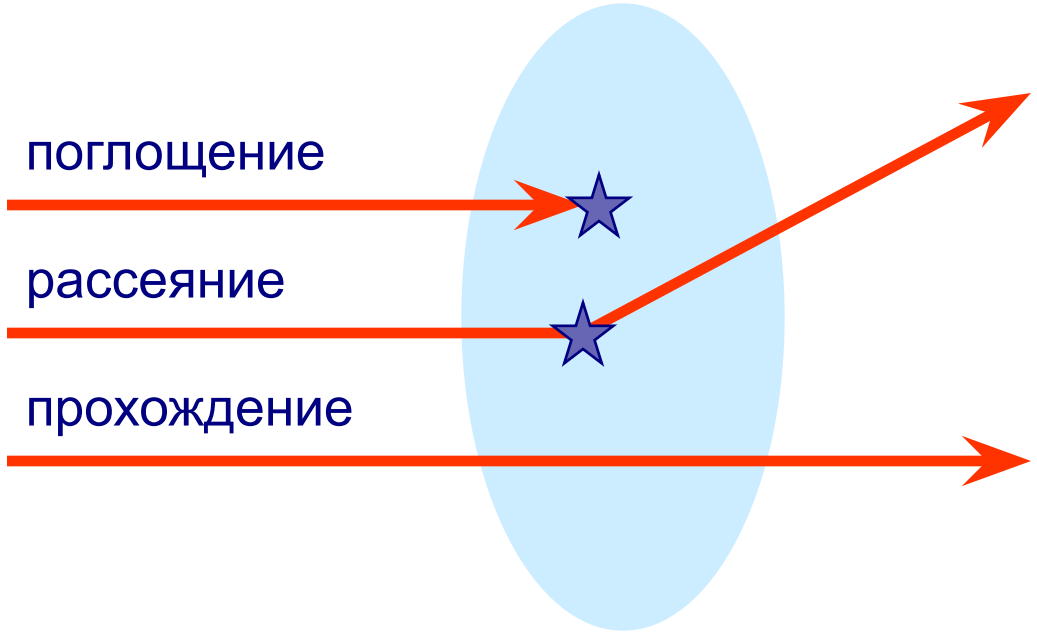
Характеристические рентгеновские лучи

Тормозное излучение

Спектр после фильтрации

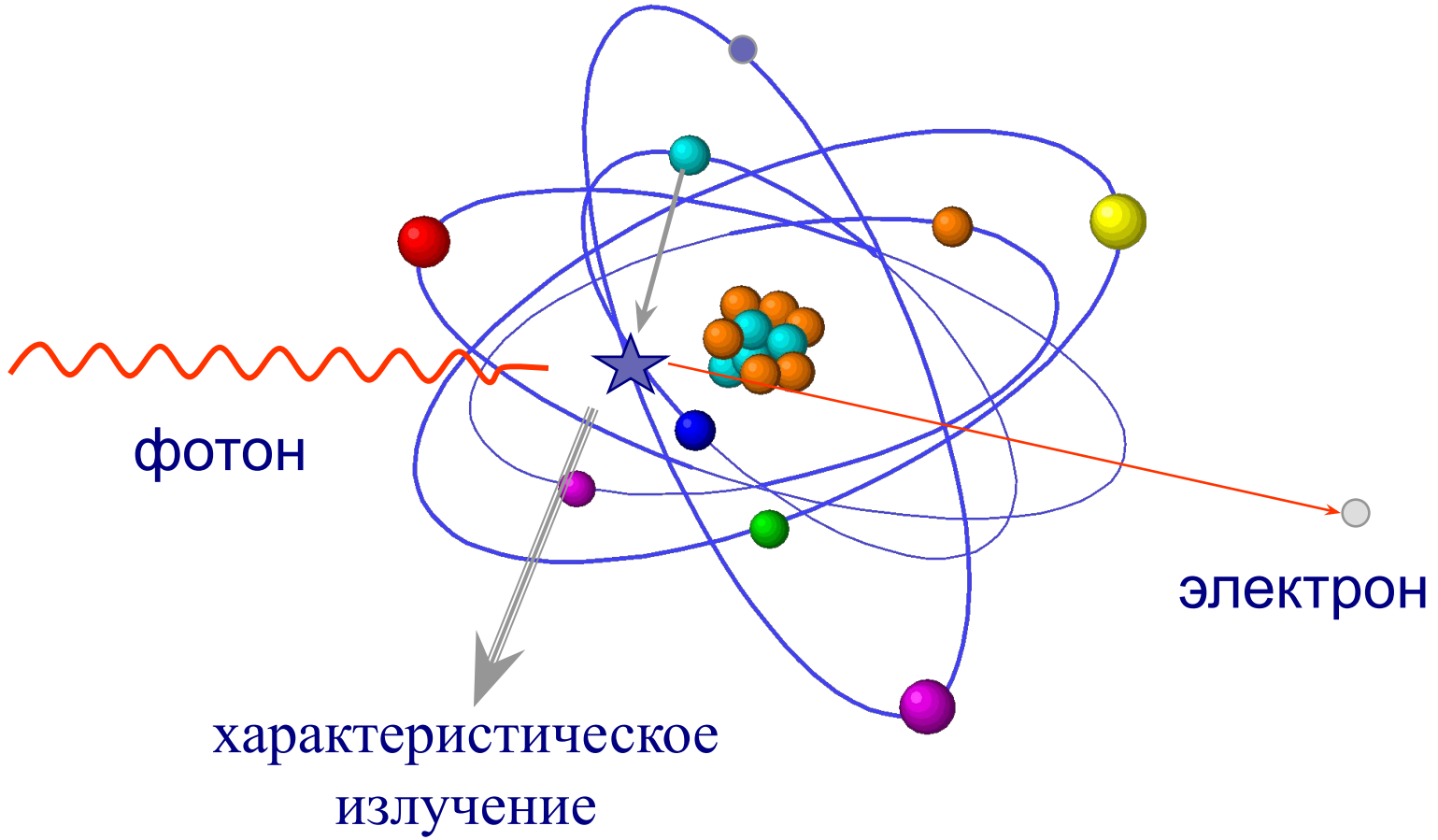
Максимальная энергия электронов

Взаимодействие фотонов с веществом

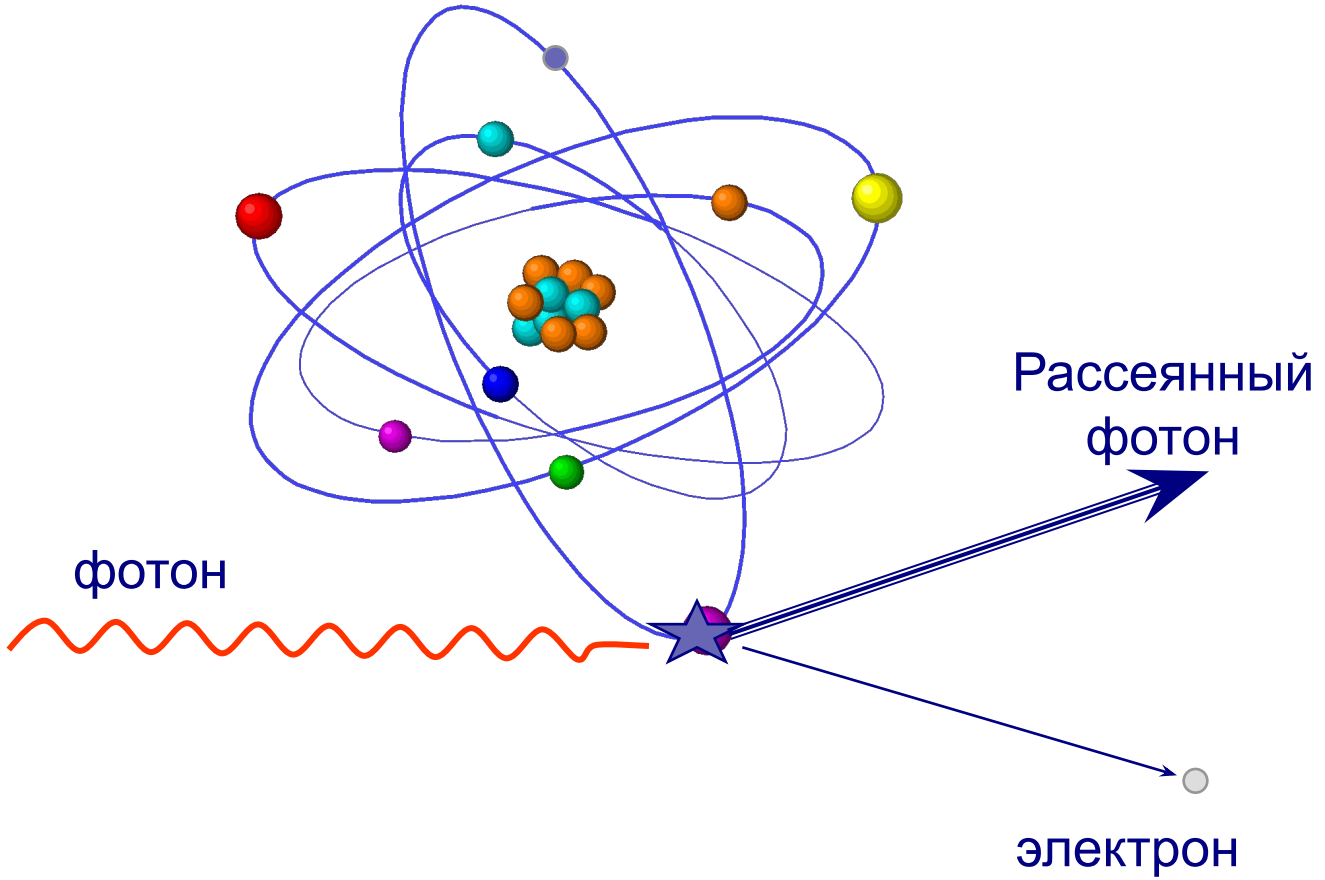


передача энергии

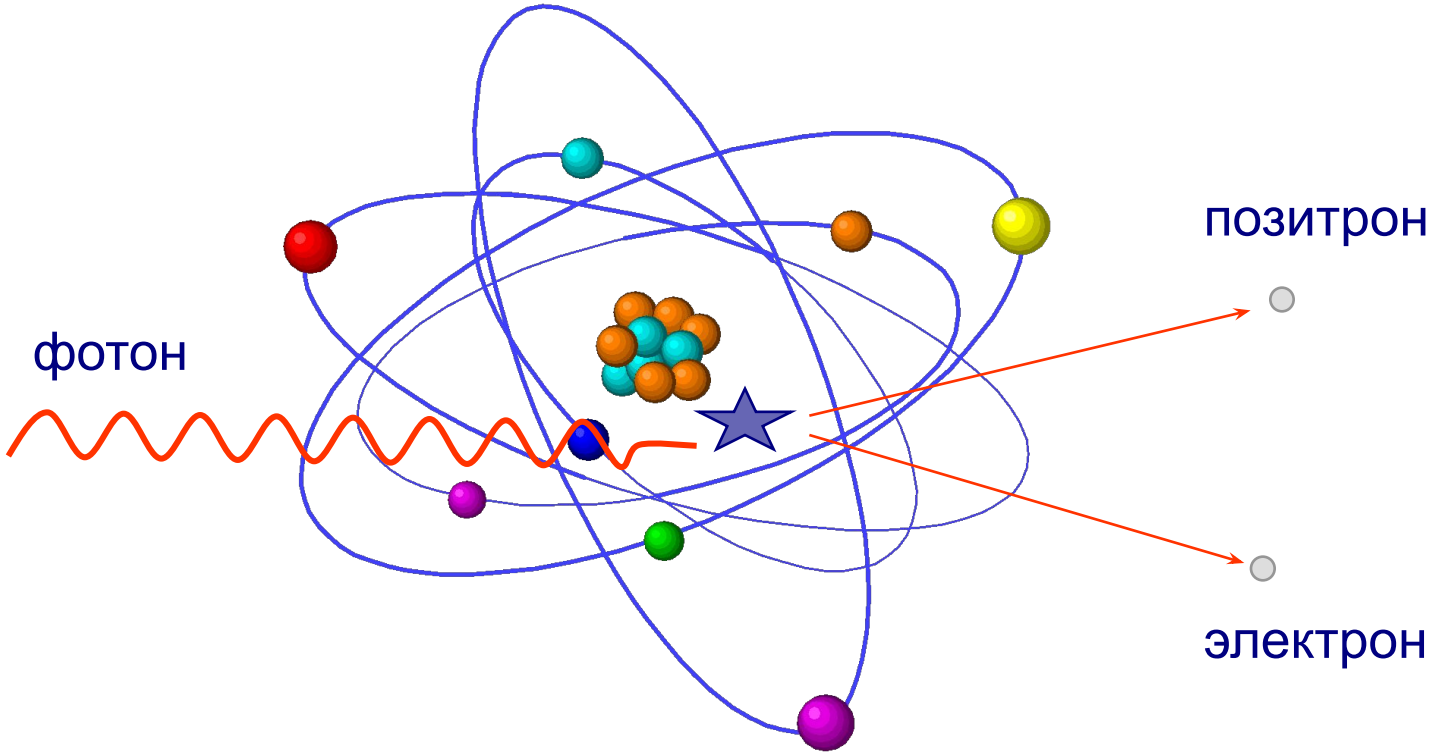
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ



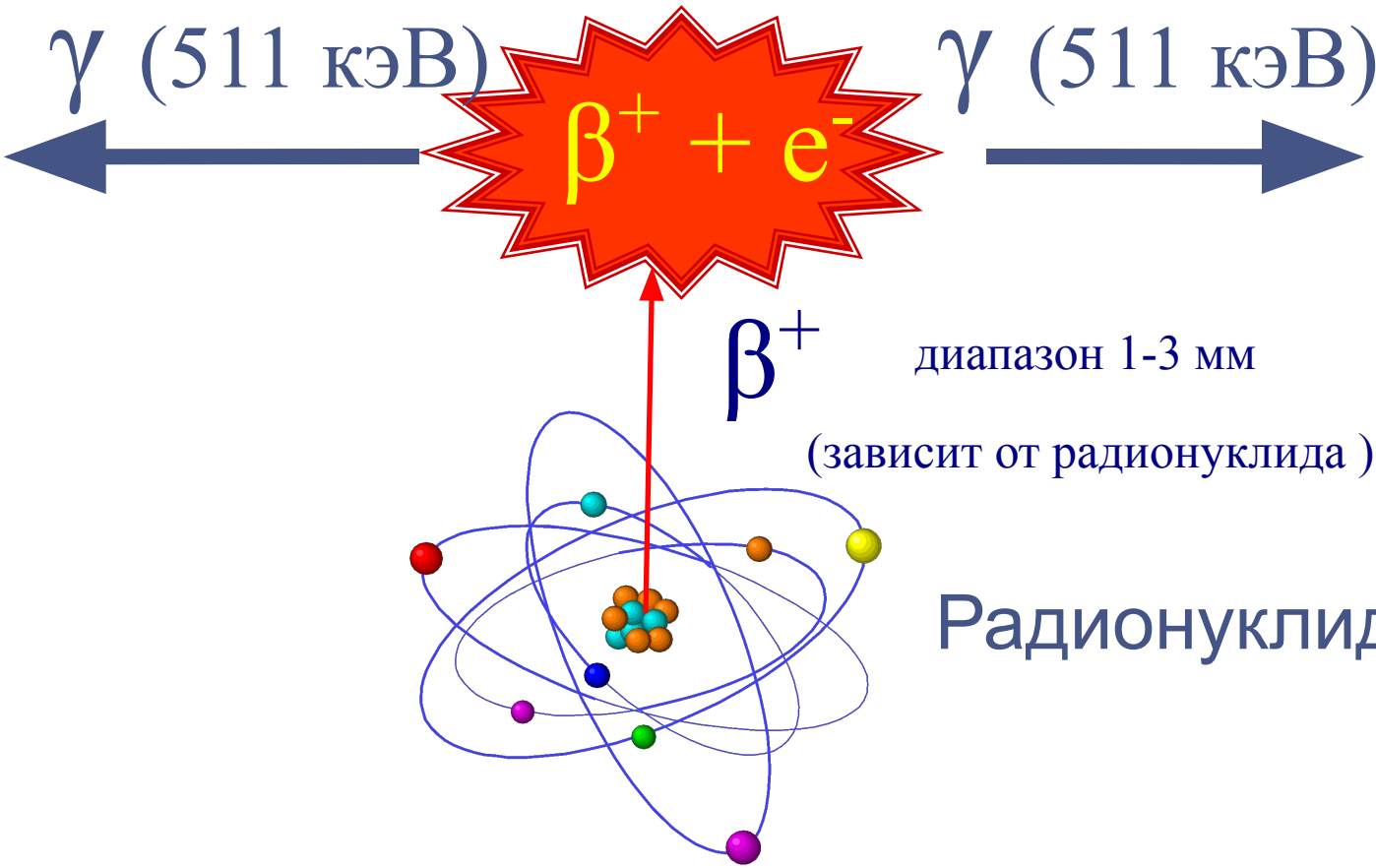
ЭФФЕКТ КОМПТОНА



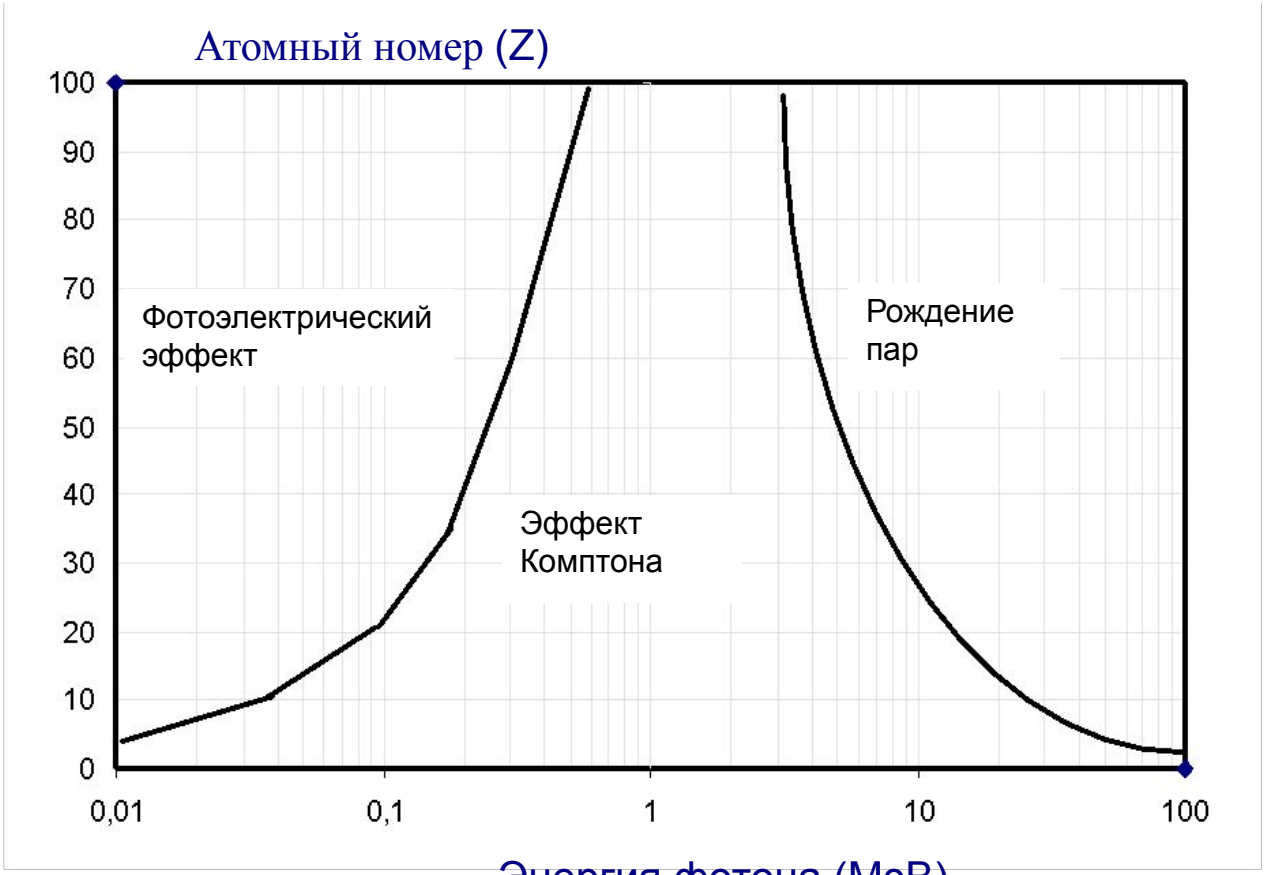
РОЖДЕНИЕ ПАР



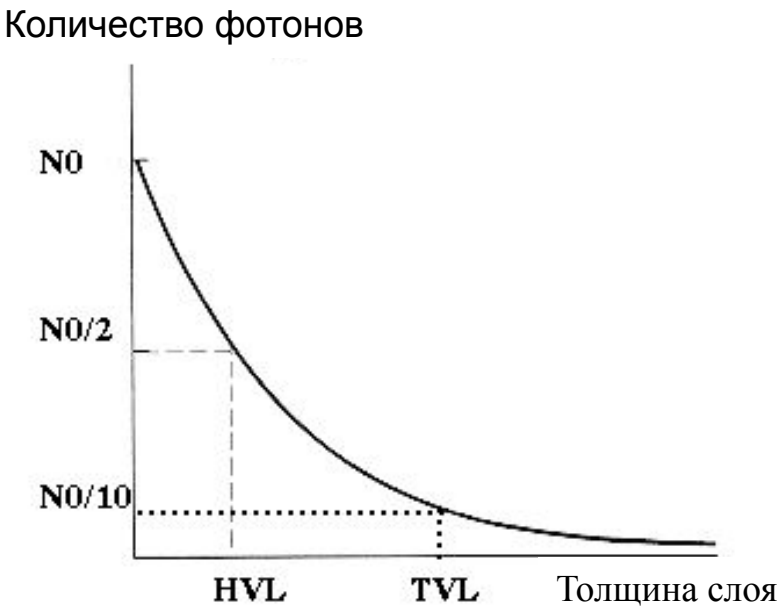
АННИГИЛЯЦИЯ



ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФОТОНА



ПРОХОЖДЕНИЕ ФОТОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО



$$N = N_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$$

d: толщина поглотителя
μ: коэффициент поглощения

HVL: слой половинного поглощения
TVL: слой 10-кратного поглощения

HVL: слой половинного поглощения

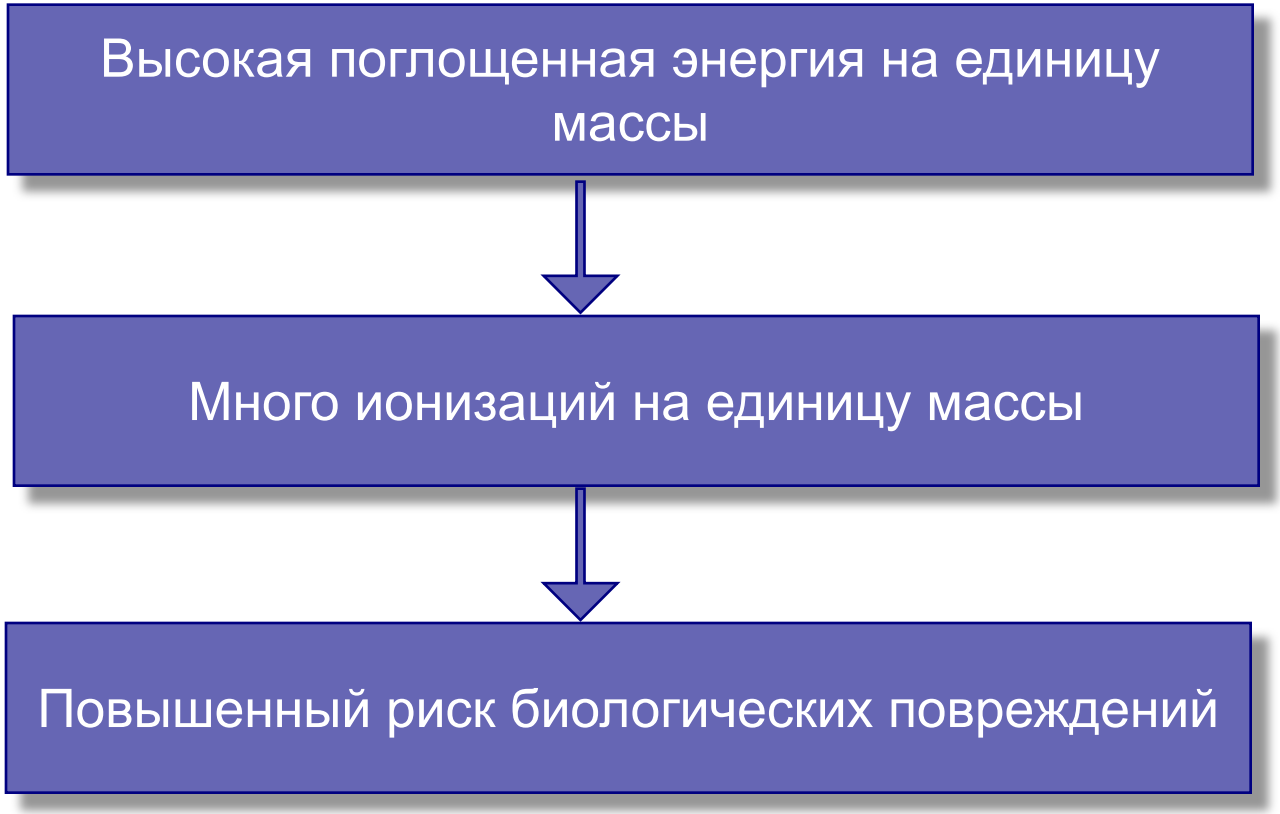
Толщина поглотителя , необходимая для поглощения 50 процентов излучения (HVL – слой половинного поглощения).

Энергия излучения	HVL (mm)	
	Бетон	Свинец
50 kV	4.3	0.06
100 kV	10.6	0.27
200 kV	25	0.52
500 kV	36	3.6
1 MV	44	7.9
2 MV	64	12.5
5 MV	96	16.5
10 MV	119	16.6
20 MV	137	16.3

Часть 2. Радиационная Физика

2.5. Радиационные величины и единицы измерения

ПОГЛОЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ

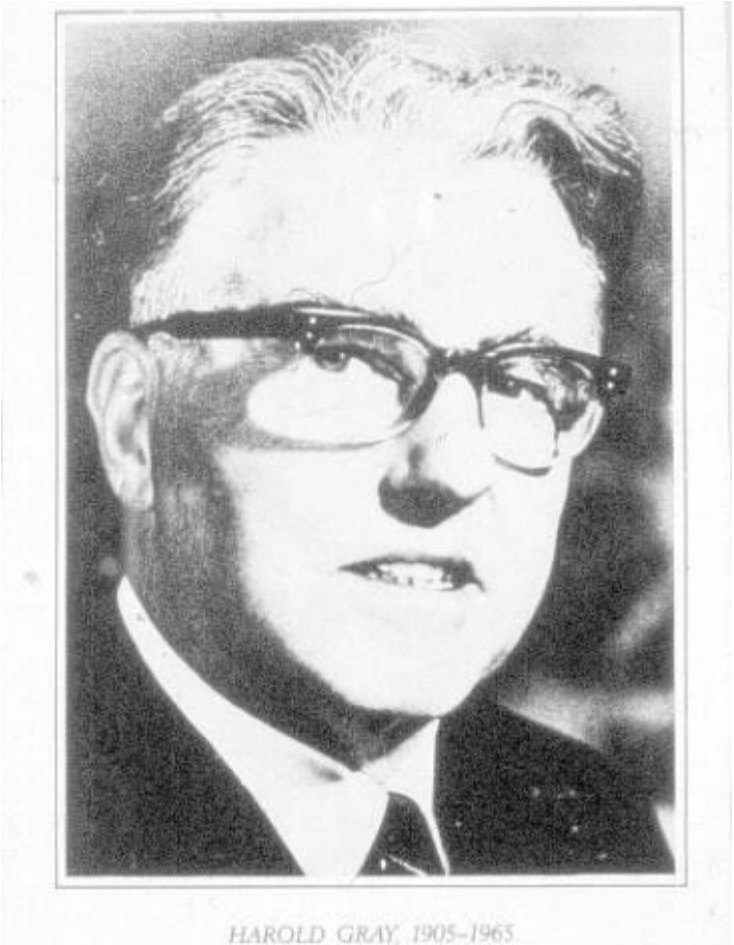


Поглощенная доза

Поглощенная энергия на единицу массы

1 Гр (грэй) = 1 Дж / кг

Гарольд Грэй (1905-1965)



HAROLD GRAY. 1905–1965.

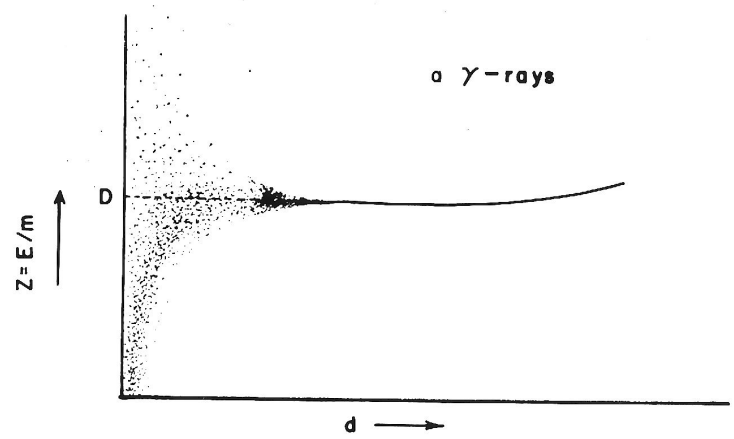
1 Гр - сравнительно большая величина

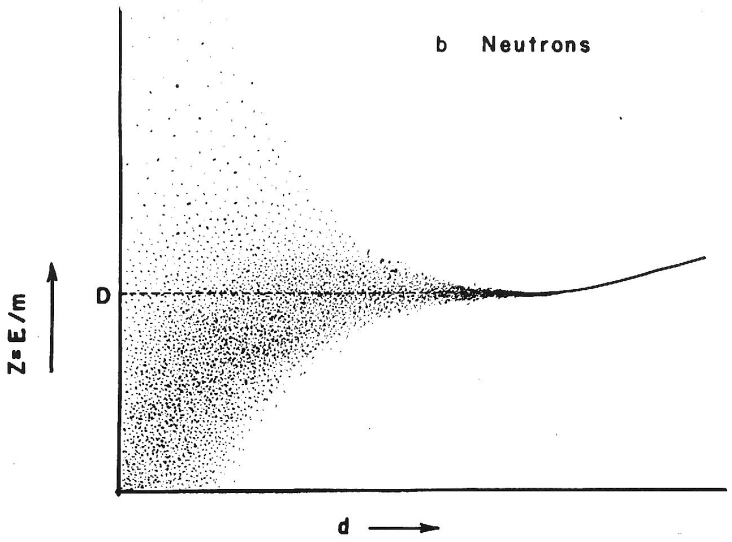
- Дозы лучевой терапии > 1Гр
- Доза в диагностической процедуре ядерной медицины обычно 0,05-0.001Гр
- Годовая доза от естественных источников излучения (земных, космических, из-за внутренней радиоактивности, радона, ...) около 0,002-0,004 Гр

Множители и Приставки (Доза)

Множитель	Приставка	Сокращения
1	-	Зв
1/1000	мили (м)	мЗв
1/1 000 000	микро (мк)	мкЗв

Предостережение:
Передача энергии веществу – это случайный процесс и определение дозы неприменимо для малых объемов (например, для одной клетки). Дисциплина «микро-дозиметрия» занимается решением этого вопроса.





По материалам Zaider 2000

Эквивалентная доза
Эффективная доза

$$H_e = w_r * D$$

D: поглощенная доза (Gy),
w_r : коэффициент качества излучения(1-20)

$$H_{eff} = w_T * H_e$$

H_e: эквивалентная доза (Sv),
w_T: взвешивающие тканевые коэффициенты (0.05-0.20)

Единица: 1 Зв (Зиверт)

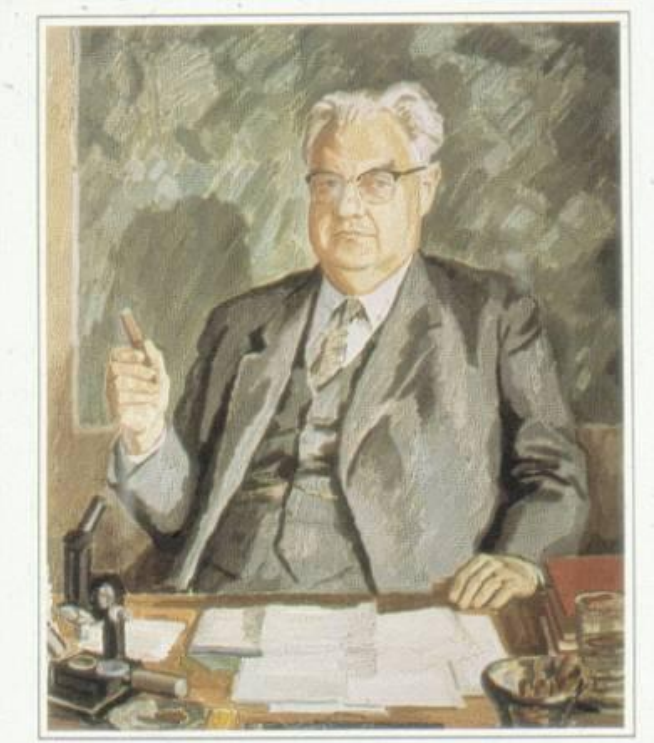
Эффективная доза

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

Ткань или орган	*взвешивающие коэффициенты*
Гонады	0.20
Костный мозг (красный)	0.12
Толстая кишка	0.12
Легкое	0.12
Желудок	0.12
Мочевой пузырь	0.05
Молочная железа	0.05
Печень	0.05
Пищевод	0.05
Щитовидная железа	0.01
Поверхность кости	0.01
Остальные органы (надпочечники, почки, мышцы, верхний отдел толстой кишки, тонкая кишка, поджелудочная железа, селезенка, вилочковая железа, матка, головной мозг)	0.05

Эффективная доза (мЗв)

Рольф Зиверт (1896-1966)



ROLF SIEVERT, 1896–1966.
Målning av Erik Kinell, 1962.
Statens strålskyddsinstitut, Stockholm.

КОЛЛЕКТИВНАЯ ДОЗА

Суммарная эквивалентная доза или эффективная доза излучения, полученная определенной группой людей, например, всеми пациентами в отделении ядерной медицины, всеми сотрудниками отделения, всем населением страны и т.д.

Единица измерения: 1 человеко-Зв

Коллективные эффективные дозы в Швеции

Источник	Коллективная мощность дозы (чел·Зв/год)	Количество смертельных раковых заболеваний в год
Природный		
космическое излучение	2500	125
внешнее	2500	125
внутреннее	1700	85
Помещения		
гамма-излучение	1700	85
радон	20000	1000
Технический		
ядерная энергетика	< 10	1
испытания ядерного оружия	200	10
другие	< 100	5
Медицинский		
диагностическая радиология	6000	300
стоматологическая радиология	500	25
ядерная медицина	500	25
Профессиональный		
диагностическая радиология	5	< 1
ядерная медицина	1	< 1
радиотерапия	1	< 1
стоматологическая радиология	5	< 1
индустрия, исследования	20	< 1
ядерная энергетика	10	< 1
шахты	100	5
Всего:	34852	1790

Часть 2. Радиационная Физика

2.6. Радиационные детекторы

Детектор является основополагающей базой для практического использования ионизирующего излучения

Знание возможностей инструментов, а также их ограничений необходимо для правильной интерпретации измерений

Материал детектора

Любой материал, в котором ионизирующее излучение создает изменения, которые могут быть измерены, может быть использован в качестве детектора ионизирующего излучения.

- Изменение цвета
- Химические изменения
- Испускание видимого света
- Электрический заряд
- …..
- …..

Активные детекторы: непосредственное измерение изменений.
Пассивные детекторы: обработка перед считыванием

Принципы детектора

- Газонаполненные детекторы
  - пропорциональные счетчики
  - счетчики Гейгера-Мюллера (ГМ)
- Сцинтилляционные детекторы
  - твердый
  - жидкий

- Другие детекторы
  - Полупроводниковые детекторы
  - Плёночные
  - Термолюминесцентные детекторы (ТЛД)

ВИДЫ ДЕТЕКТОРОВ

1) Счетчики

- Газонаполненные детекторы
- Сцинтилляционные детекторы

2) Спектрометры

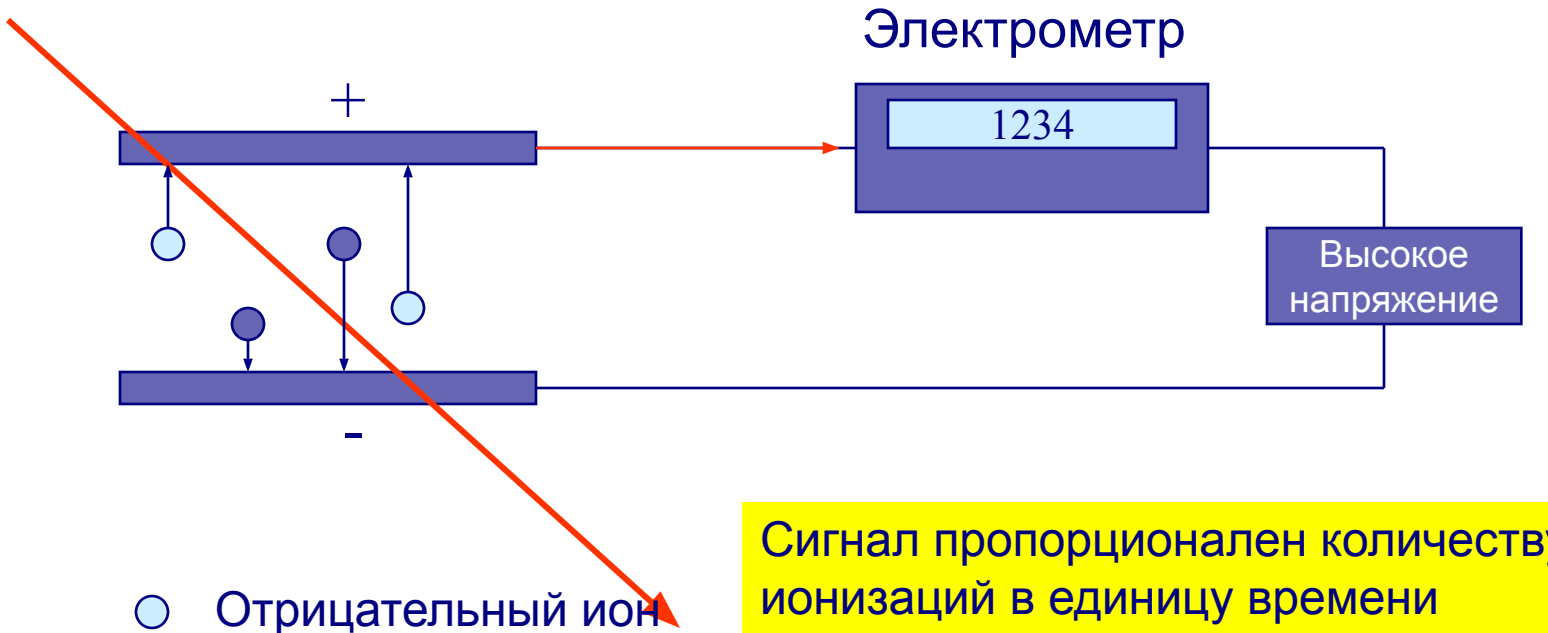
- Сцинтилляционные детекторы
- Твердотельные детекторы

3) Дозиметры

- Газонаполненные детекторы
- Твердотельные детекторы
- Сцинтилляционные детекторы
- Термолюминесцентные детекторы
- Плёночные

Газонаполненные детекторы

ИОНИЗАЦИОННЫЕ КАМЕРЫ



Сигнал пропорционален количеству ионизаций в единицу времени (активность, мощность излучения)

ИОНИЗАЦИОННЫЕ КАМЕРЫ

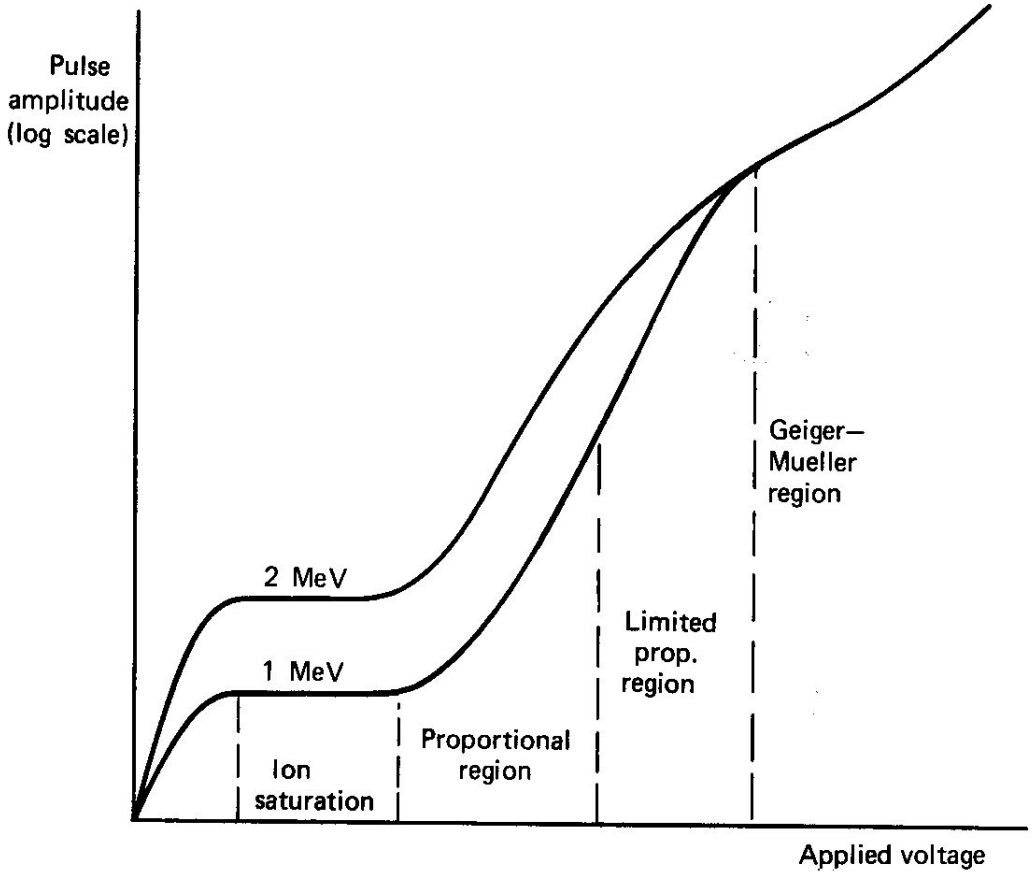
Использование в ядерной медицине

- **Радиометр - дозкалибратор**
- **Инструменты мониторинга (радиометрического контроля)**

Общие свойства ионизационных камер

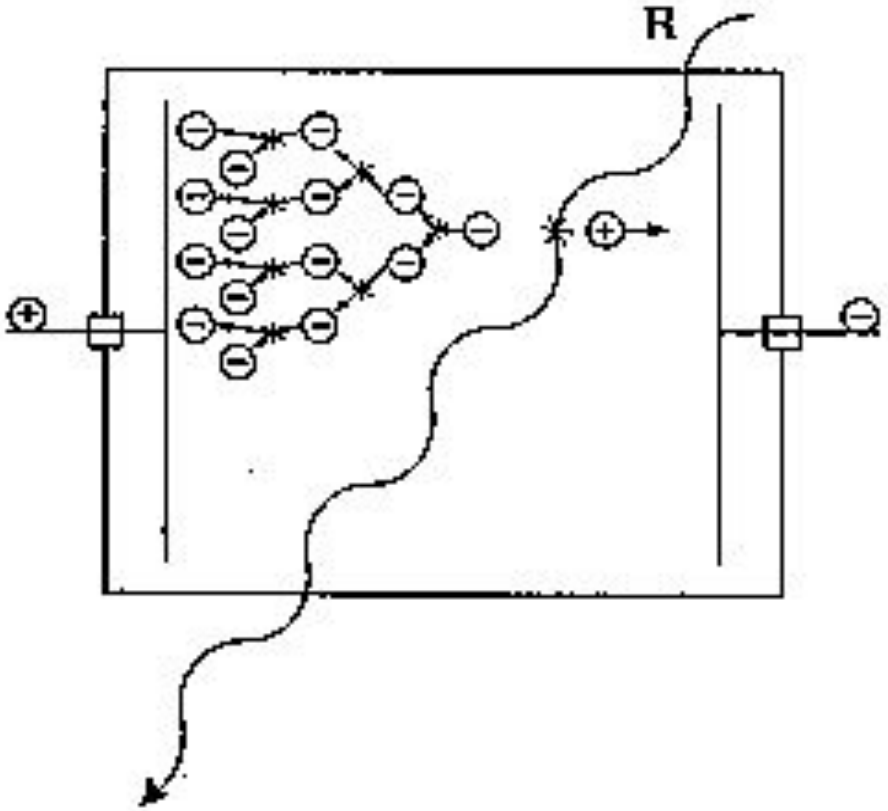
- Высокая точность
- Стабильность
- Относительно низкая чувствительность

Диапазоны работы для газонаполненных детекторов



Knoll

Пропорциональный счетчик



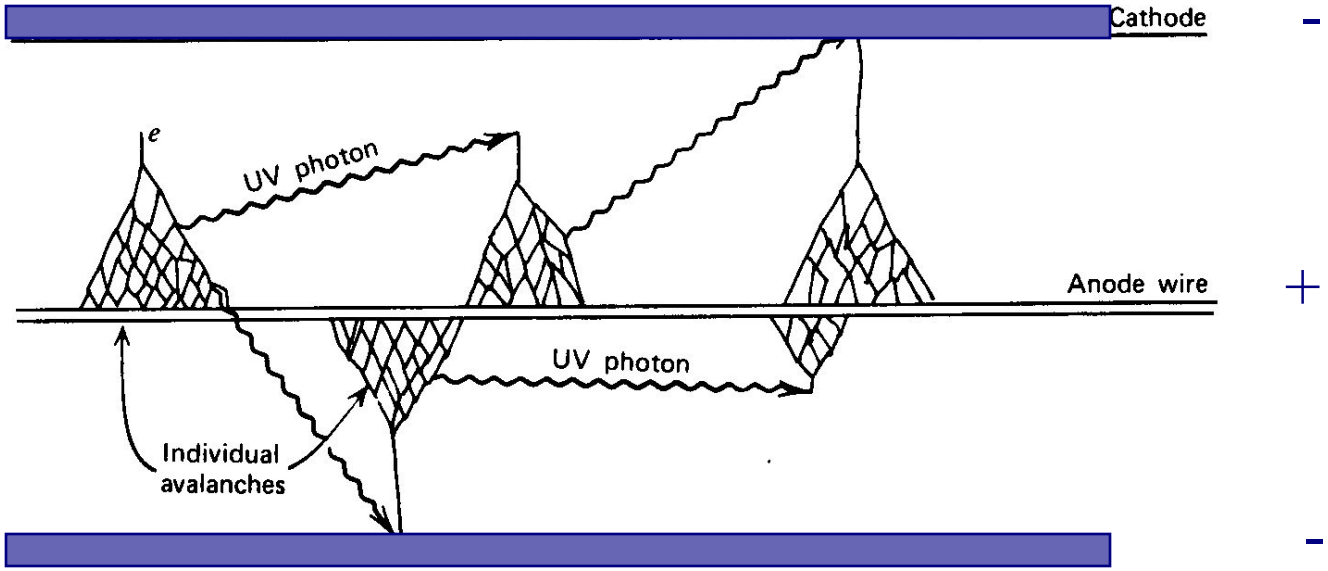
Пропорциональный счетчик
Использование в ядерной медицине

- **Инструменты мониторинга (радиометрического контроля)**

Свойства пропорциональных счетчиков

- Чувствительность немного выше, чем у ионизационной камеры
- Используется для регистрации частиц и фотонов низкой энергии

Принцип действия счетчика Гейгера Мюллера



Knoll

Единственная случайная частица может быть причиной полной ионизации

Счетчик Гейгера-Мюллера
Использование в ядерной медицине

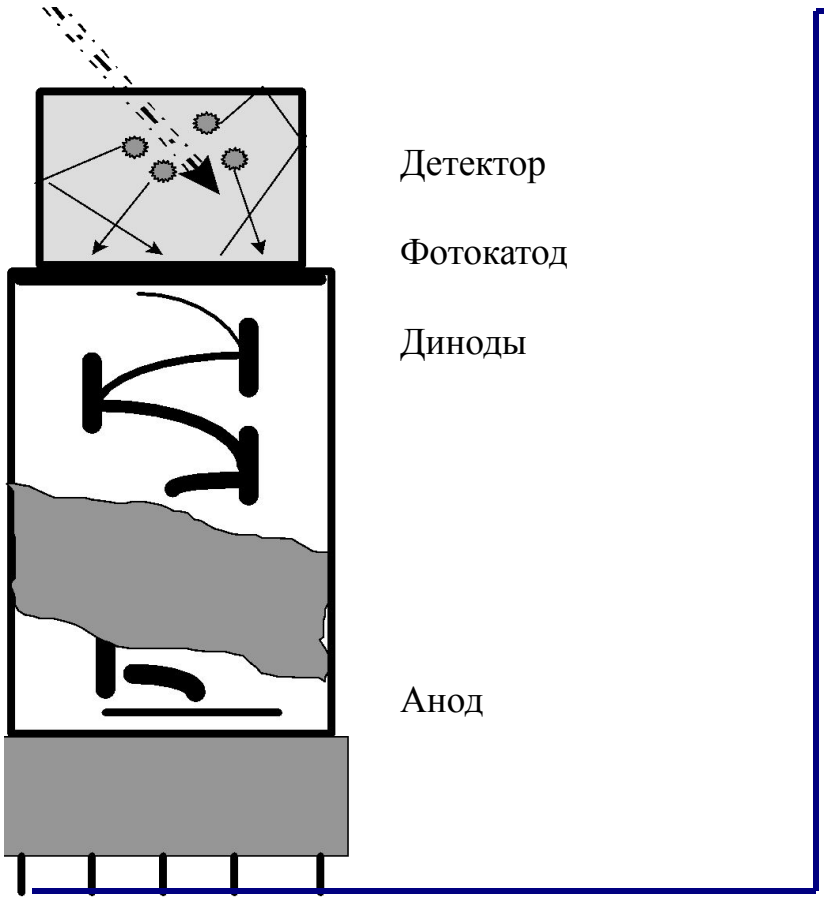
- Радиометр для контроля загрязнения
- Дозиметр (если калиброванный)

Общие свойства счетчика Гейгера-Мюллера

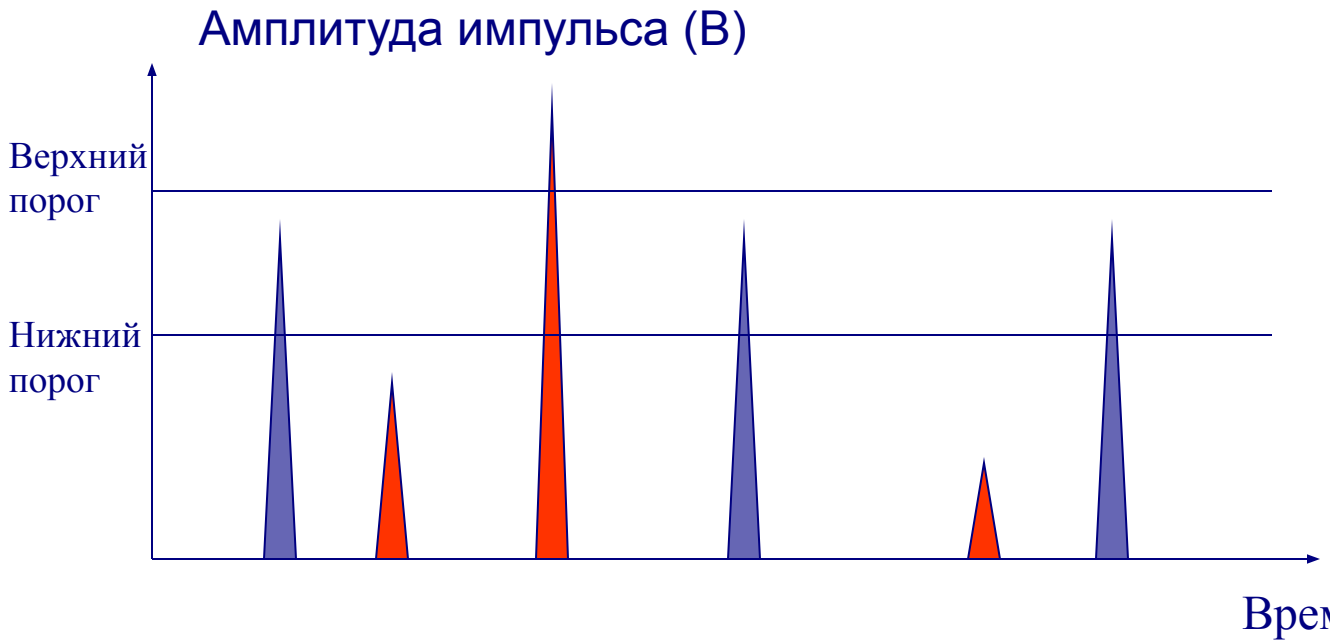
- Высокая чувствительность
- Низкая точность

Сцинтилляционные детекторы

Сцинтилляционный детектор



Анализатор амплитуды импульса



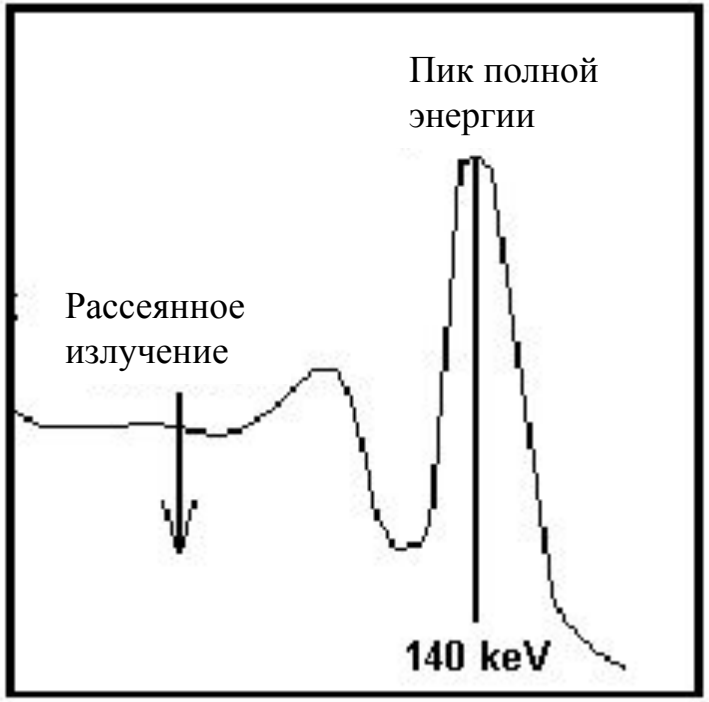
Анализатор амплитуды импульса позволяет подсчитывать только импульсы определенной амплитуды (энергии).

Сосчитаны

Несосчитаны

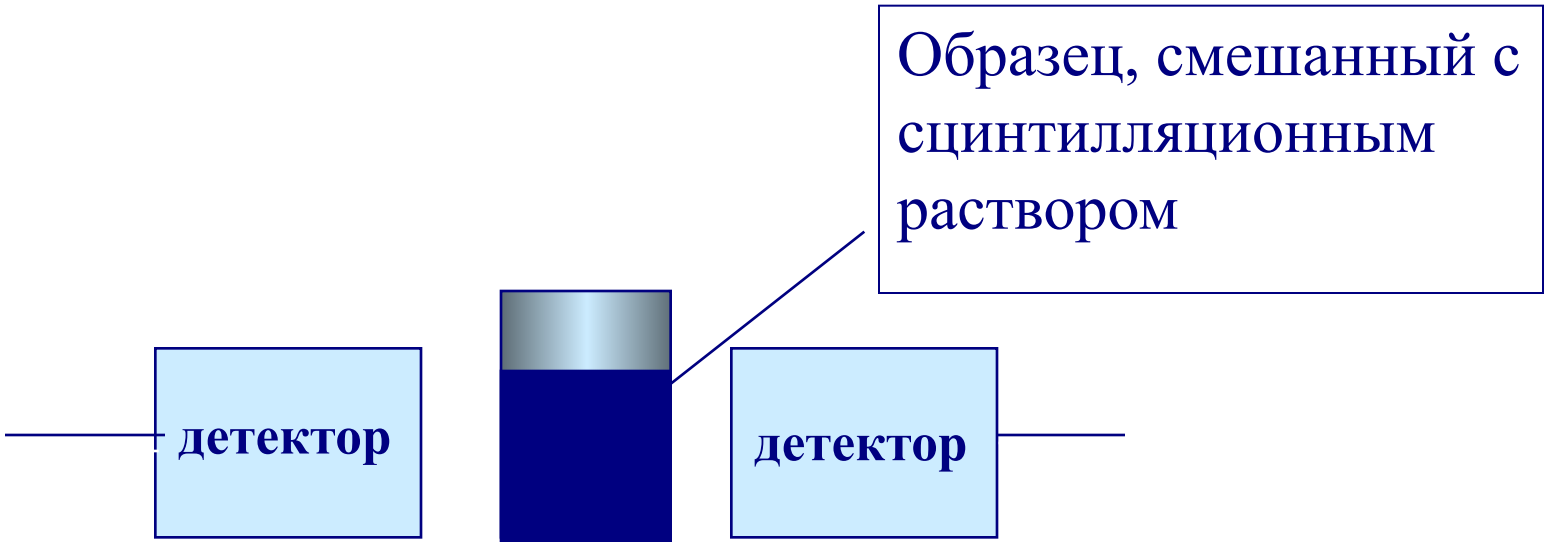
Распределение амплитуд импульсов NaI(Tl)

Скорость счета



Амплитуда импульса (энергия)

Жидкостные сцинтилляционные детекторы



Сцинтилляционные детекторы Использование в ядерной медицине

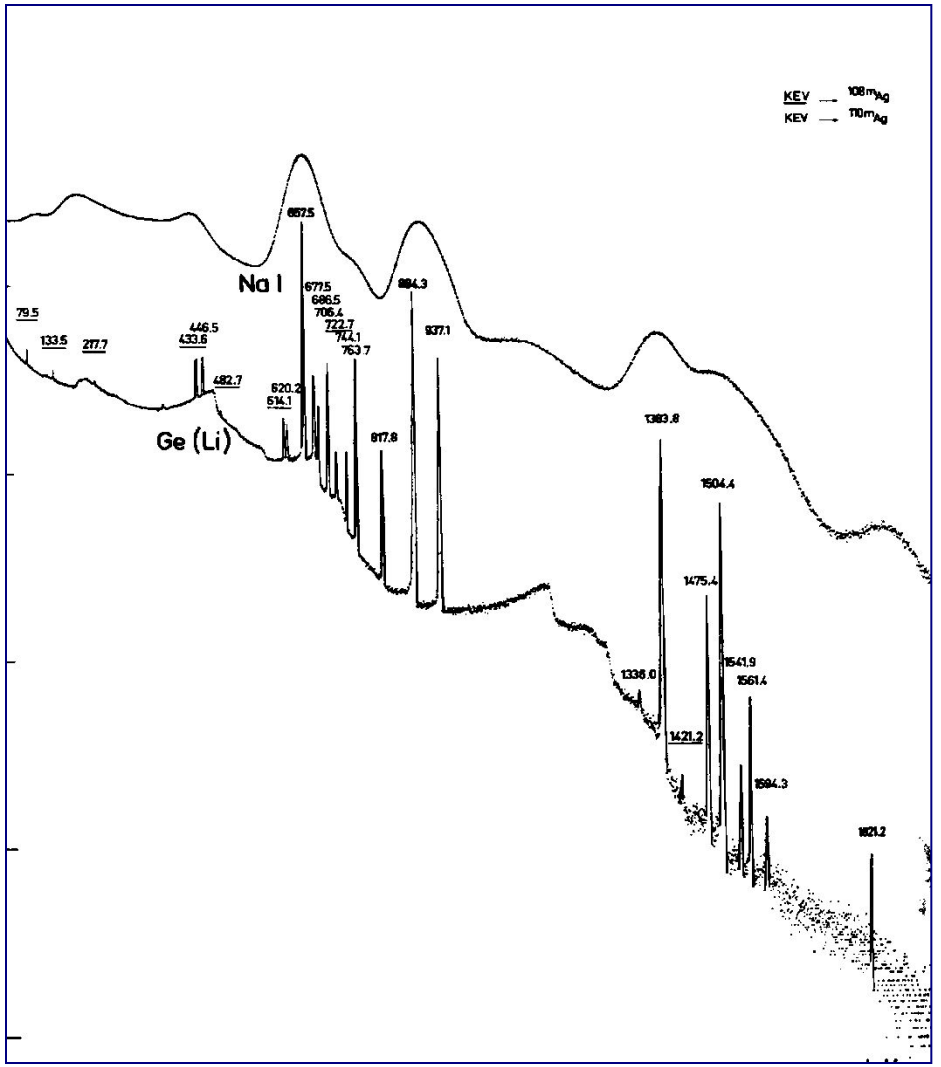
- **Счетчик образцов**
- **Одно- и много- пробные системы**
- **Гамма-камеры**
- **Инструменты контроля**

Другие детекторы

Полупроводниковые детекторы в качестве спектрометра

- Детекторы, использующие кристаллический германий или Ge(Li) кристалл
- Принцип: электронно-дырочные пары (аналогично парам ион - электрон в газонаполненных детекторах)
- Отличное энергетическое разрешение

Сравнение спектра от Na(I) сцинтилляционного детектора и Ge (Li) полупроводникового детектора



Knoll

Полупроводниковые детекторы

Применение в ядерной медицине

- Идентификация нуклидов
- Контроль чистоты радионуклидов

Плёночные

Принцип: как у обычной фотопленки

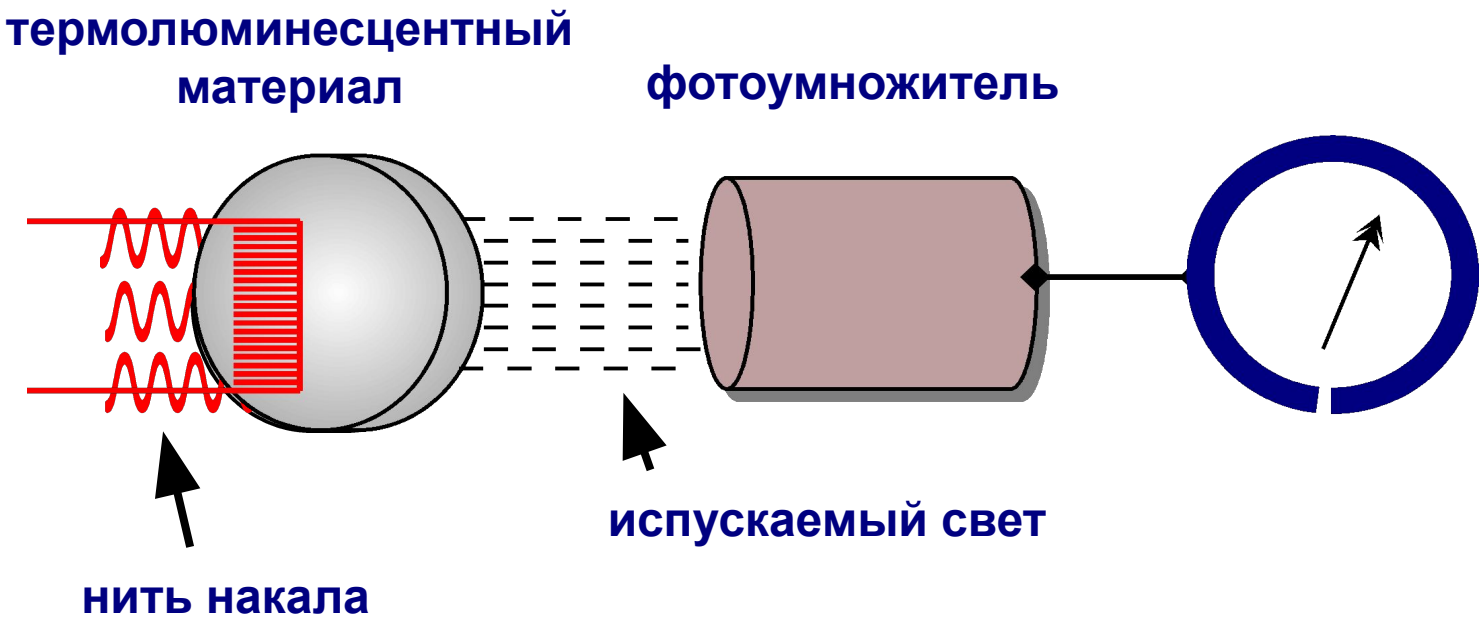
Зёрна галида серебра, в результате облучения и проявления, превращаются в металлическое серебро

Применение в ядерной медицине: Индивидуальный дозиметр

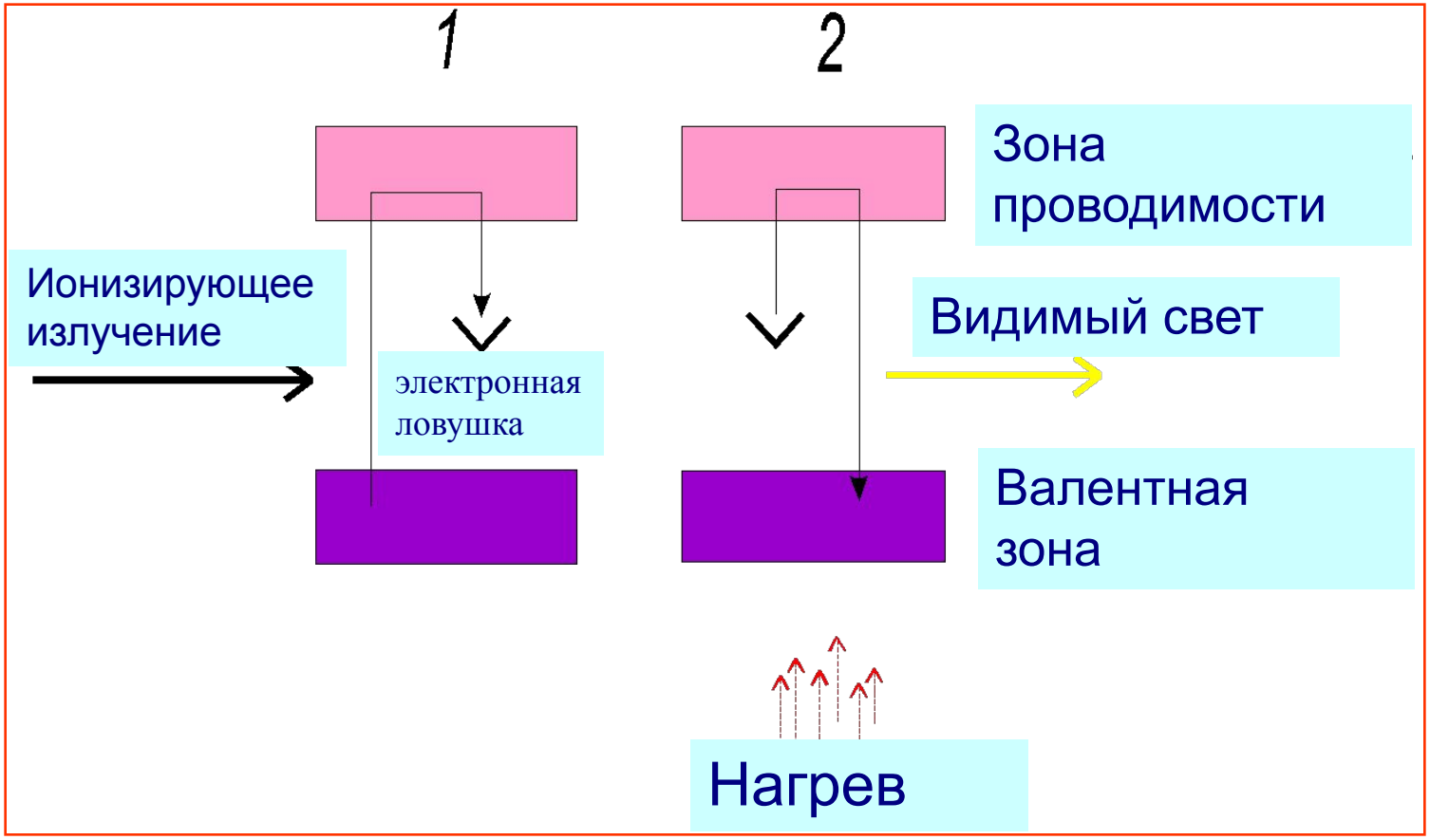
Плёночные

- Требуется обработка ---> проблемы с воспроизводимостью
- Двумерный дозиметр
- Высокое пространственное разрешение
- Высокий атомный номер ---> зависимость сигнала от качества излучения

Принцип термолюминесценции ТЛД



Упрощенная схема процесса ТЛД



Термолюминесцентная дозиметрия (ТЛД)

- Мелкие кристаллы
- Эквивалентны тканям организма
- Пассивный дозиметр – кабели не требуются
- Широкий дозиметрический диапазон (от мкГр to 100 Гр)
- Много различных применений

ТЛД

Применение в ядерной медицине

- **индивидуальные дозиметры (тело, пальцы…)**
- **специальные измерения**

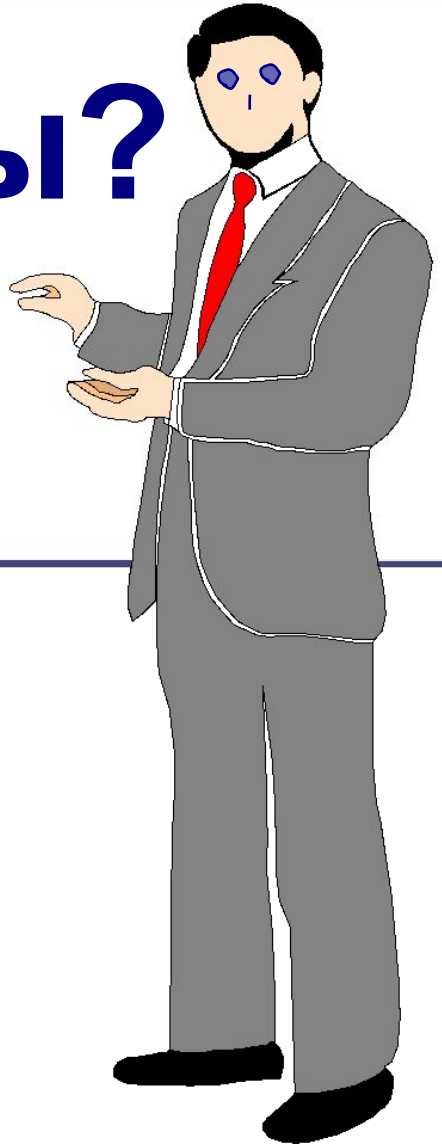
ТЛД

Недостатки:

Требует много времени

Не создает постоянной записи

Вопросы?



ОБСУЖДЕНИЕ

В определенный момент времени Mo / Tc генератор содержит 15 ГБк Mo-99. Какую концентрацию активности Tc-99м мы получим через 15 часов, если объем элюации 3 мл? Предположить эффективность элюации 75%.

ОБСУЖДЕНИЕ

Лечение проводится с помощью йода-131. Какие типы взаимодействия испускаемого излучения с мягкими тканями человека доминирут?

ОБСУЖДЕНИЕ

Лаборатория выполняет работу с H-3. Обсудите подходящий тип детектора для обнаружения загрязнений оборудования и рабочих мест.

Где получить дополнительную информацию?

- **Дальнейшее чтение**
  - WHO. Manual on Radiation Protection in Hospital and General Practice. Volume 1 Basic Requirements (Всемирная организация здравоохранения. Руководство по радиационной защите в медучреждениях и в общей практике. Том 1. Основные требования)
  - Sorensen JA & Phelps ME. Physics in Nuclear Medicine. Grune & Stratton, 1987