

# Л2: Дозиметрические принципы, величины и единицы

---

Шатенок М.П. м.н.с. РОНЦ им. Н.Н. Блохина



**IAEA**

International Atomic Energy Agency

## 2.2 ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ

### 2.2.1 Поле излучения

- Понятие **поле излучения** используется для количественного описания распределения излучения в пространстве, заполненном различными частицами.
- Существует две важные величины, связанные с полем излучения :
  - **Число** частиц  $N$  - включает все частицы, которые возникают, излучаются, или переносятся (единица – 1)
  - **Энергия**  $R$ , переносимая частицами (которая часто ассоциируется с энергией излучения) – это энергия (за исключением энергии покоя) , которая излучается, переносится, или передается (единица – Джоуль)

$$R = E \times N$$

## 2.2 ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ

### 2.2.1 Поле излучения

Детальное описание поля излучения требует более полной информации о числе частиц  $N$ , а именно:

- Тип частиц  $j$
- точка интереса  $\vec{r}$
- энергия  $E$
- время  $t$
- Направление движения  $\vec{\Omega}$


$$N = N_j(\vec{r}, E, t, \vec{\Omega})$$

# 2.2 ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ

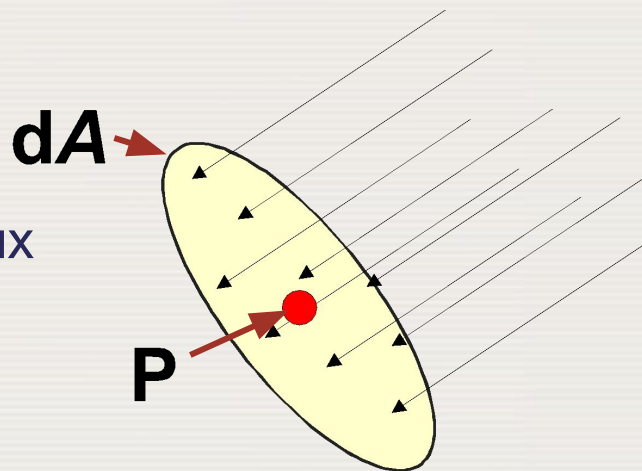
## 2.2.2 Поток частиц

### Как определить число частиц в некоторой точке?

Рассмотрим точку  $P(\vec{r})$  в поле излучения и используем следующий метод.

В случае параллельного пучка излучения поместим площадку размером  $dA$  вокруг точки таким образом, что ее плоскость **перпендикулярна** направлению пучка.

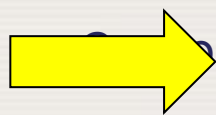
Определим число частиц, пересекающих площадку  $dA$ .



## 2.2 ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ

### 2.2.2 Флюенс частиц

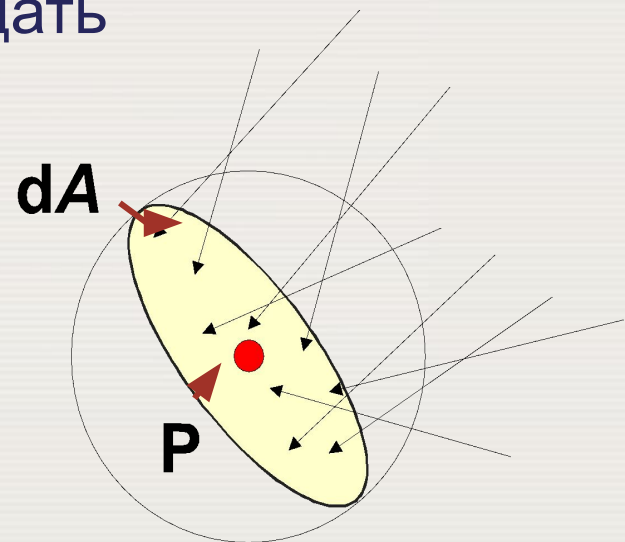
В случае **непараллельных направлений** движения частиц невозможно сориентировать площадку таким образом, чтобы все частицы падали на нее перпендикулярно.



Следует очевидным, что необходима другая концепция!

Если позволить площадке  $dA$  свободно вращаться вокруг  $P$ , тогда каждая падающая частица сможет падать на площадку  $dA$  перпендикулярно. Практическая реализация этого решения сводится к следующему:

- Вращением площадки  $dA$  вокруг  $P$  создается **сфера**
- Определяется число частиц, **входящих** в сферу



## 2.2 ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ

### 2.2.2 Флюенс частиц

☐ Соотношение между числом частиц и площадью называется **флюенсом**  $\Phi$ .

☐ **Определение:**

Флюенс  $\Phi$  есть отношение  $dN$  к  $dA$ , где  $dN$  есть число частиц падающих на сферу с сечением  $dA$ :

$$\Phi = \frac{dN}{dA}$$

единица флюенса:  $\text{м}^{-2}$ .

☐ Примечание: **флюенс частиц** иногда заменяют на **флюенс**.

## 2.2 ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ

### 2.2.4 Флюенс энергии

□ Та же концепция может быть применена к излученной энергии  $R$ :

□ **Определение:**

Флюенс энергии  $\Psi$  определяется как отношение  $dR$  к  $dA$ , где  $dR$  излученная энергия, падающая на сферу поперечного сечения  $dA$ :

$$\Psi = \frac{dR}{dA}$$

Единица флюенса энергии: Дж/м<sup>2</sup>.

## 2.2 ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ

### 2.2.4 Флюенс энергии

- Флюенс энергии может быть вычислен из следующего соотношения:

$$\Psi = \frac{dN}{dA} \cdot E = \Phi E,$$


где  $E$  – энергия частиц и  $dN$  - число частиц с энергией  $E$ .



## 2.2 ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ

### 2.2.5 Спектр флюенса частиц

- Естественные пучки фотонов или других частиц являются поли-энергетическими.

 более точного описания флюенс частиц можно заменить флюенсом частиц, дифференцированным по энергии:

$$\Phi_E(E) = \frac{d^2N(E)}{dA \cdot dE} = \frac{d\Phi(E)}{dE}$$

Флюенс частиц, дифференцированный по энергии, также называют спектром флюенса частиц.

## 2.2 ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ

### 2.2.6 Флюенс энергии

Аналогичную концепцию можно применить и к **излученной энергии R**:

- Флюенс энергии, **дифференцированный** по энергии, определяется как:

$$\Psi_E(E) \equiv \frac{d\Psi}{dE}(E) = \frac{d\Phi}{dE}(E)E$$

- Флюенс энергии, **дифференцированный** по энергии, также называют **спектром флюенса энергии**

# 2.2 ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ

## 2.2.6 Флюенс энергии

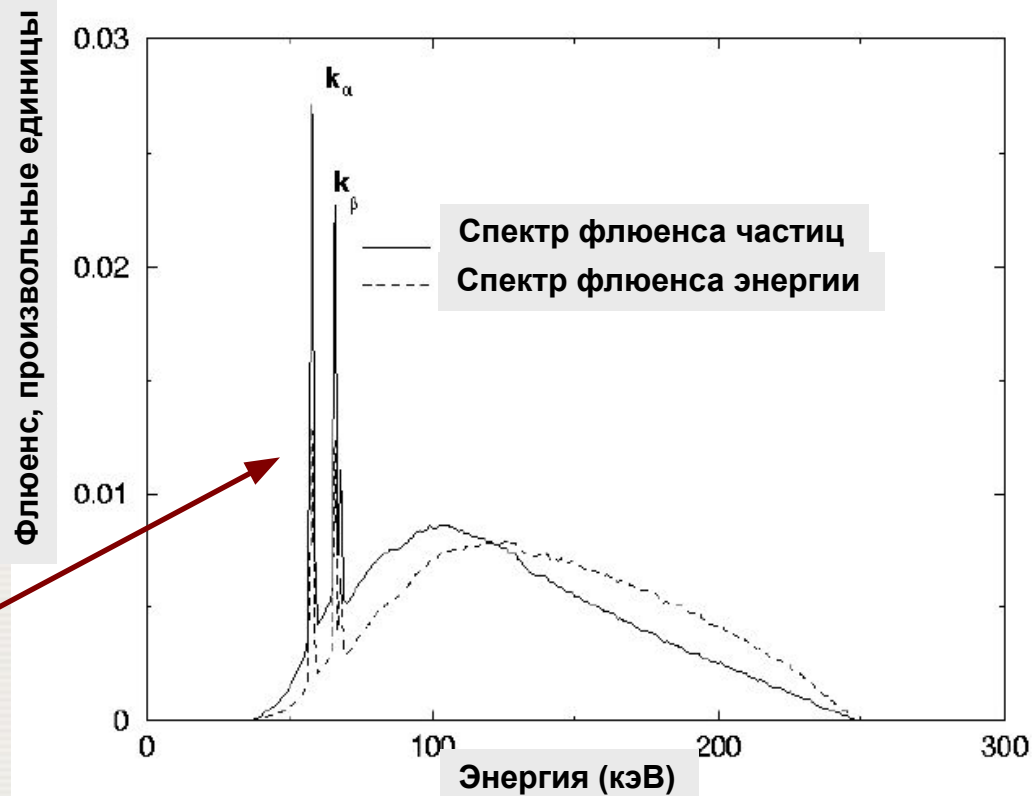
### Пример:

спектр флюенса фотонов и спектр флюенса энергии для пучка рентгеновского излучения,  $kV_p = 250 \text{ kV}$ , фильтр  $1 \text{ mm Al}$  и  $1.8 \text{ mm Cu}$ .

Материал мишени: вольфрам;  
бериллиевое окно:  $2 \text{ mm}$

Спектр часто отражает физическую природу явления:

Два пика на фоне непрерывного спектра рентгеновского излучения соответствуют характеристическим линиям  $K_\alpha$  и  $K_\beta$  для мишени из вольфрама.



## 2.2 ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ

### 2.2.7 Мощность флюенса частиц и мощность флюенса энергии

□ Флюенс частиц или флюенс энергии могут меняться со временем.

- Для описания временной зависимости величины флюенса заменяются величинами, дифференцированными по времени:

$$\dot{\Phi} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d^2N}{dA \cdot dt} \qquad \dot{\Psi} = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d^2R}{dA \cdot dt}$$

единица:  $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$

единица :  $\text{Дж м}^{-2}\text{с}^{-1}$

- Две величины, дифференцированные по времени, называются мощность флюенса частиц и мощность флюенса энергии. Последняя также называется ИНТЕНСИВНОСТЬ.

## 2.3 Дозиметрические величины: основы

### 2.3.1 Введение

Последующие слайды иллюстрируют использование трех дозиметрических величин:

- (1) Кермы
- (2) Семы
- (3) Поглощенной дозы

## 2.3 Дозиметрические величины: основы

### 2.3.1 Введение

Общие характеристики Кермы, Семы и Поглощенной дозы:

- Обычно определяются как:

$$\frac{\text{энергия излучения (переданная или поглощенная)}}{\text{масса}} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]$$

- Могут быть также определены из соотношения:

$$\chi(\text{характеристика поля}) \times (\text{массовый коэффициент взаимодействия}) \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]$$

## 2.3 Дозиметрические величины: основы

### 2.3.1 Введение

□ Первая характеристика:

$$\text{дозиметрическая величина} = \frac{\text{излученная энергия (переданная или поглощенная)}}{\text{масса}} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]$$

требует более детального рассмотрения того, как происходят следующие процессы:

- Передачи энергии излучения
- Поглощения энергии излучения

## 2.3 Дозиметрические величины: основы

### 2.3.2 Основы процесса поглощения энергии

#### Определение переданной энергии

- Термин "переданная энергия" относится к **отдельному** процессу взаимодействия
- Переданная энергия  $\varepsilon_i$  - есть энергия, переданная в отдельном взаимодействии  $i$ :

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{in} - \varepsilon_{out} + Q \quad \text{Единица: Дж}$$

где:

$\varepsilon_{in}$  = энергия налетающей частицы (исключая энергию покоя)

$\varepsilon_{out}$  = сумма энергий всех ионизирующих частиц, покидающих место взаимодействия (исключая энергии покоя),

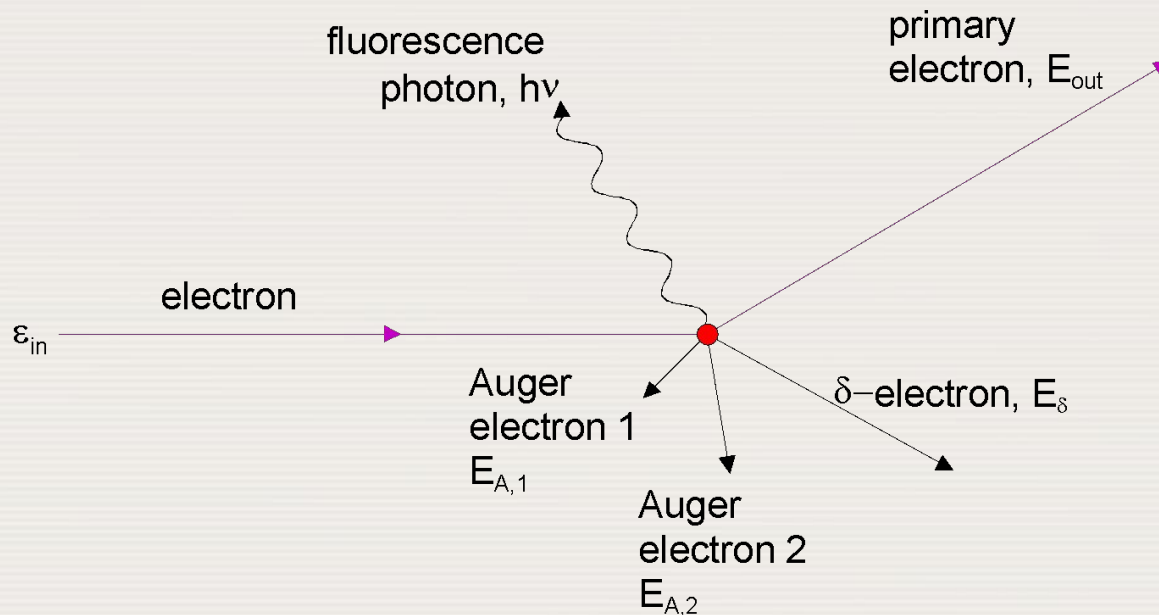
$Q$  = изменение остаточных энергий ядер и всех других частиц, вовлеченных во взаимодействие.



## 2.3 Дозиметрические величины: основы

### 2.3.2 Основы процесса поглощения энергии

**Пример:** Переданная энергия  $\varepsilon_i$  с  $Q = 0$  (взаимодействие с выбиванием электрона).

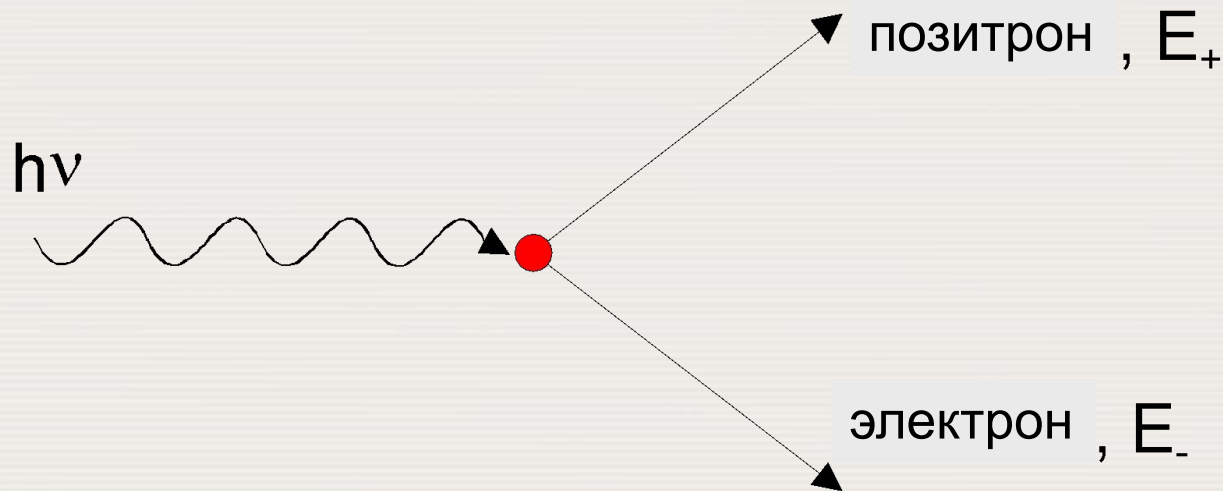


$$\varepsilon_i = \varepsilon_{in} - (E_{out} + E_{A,1} + E_{A,2} + E_{\delta} + h\nu)$$

## 2.3 Дозиметрические величины: основы

### 2.3.2 Основы процесса поглощения энергии

Пример: Переданная энергия  $\varepsilon_i$  с  $Q < 0$  (производство пар):

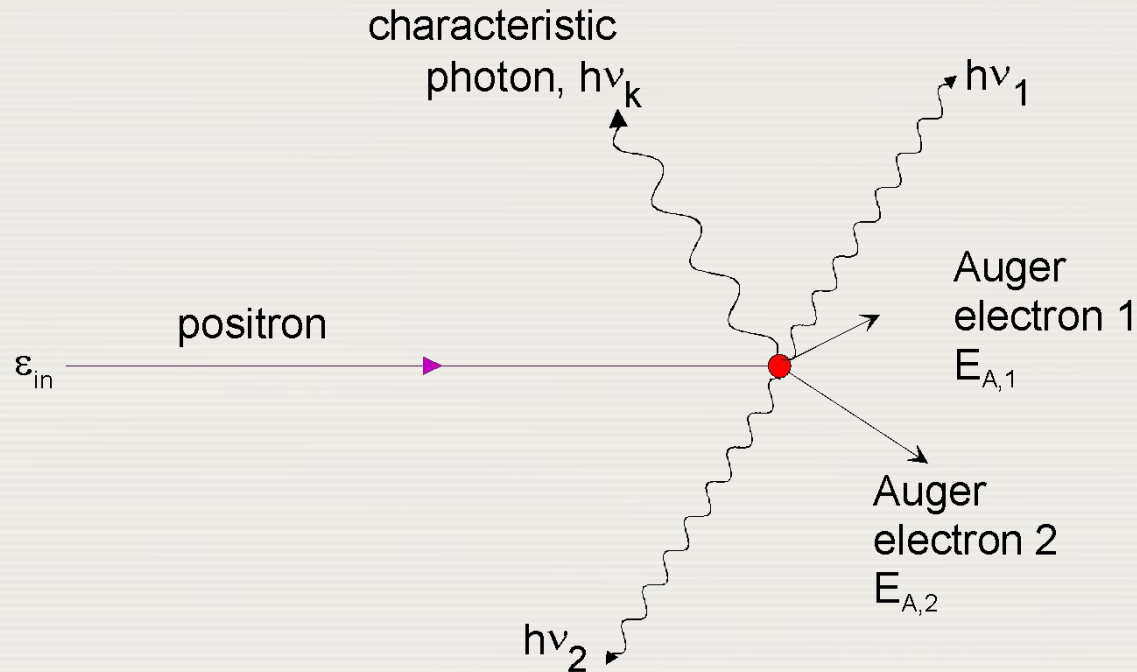


$$\varepsilon_i = h\nu - (E_+ + E_-) - 2m_0c^2$$

## 2.3 Дозиметрические величины: основы

### 2.3.2 Основы процесса поглощения энергии

Пример: Переданная энергия  $\varepsilon_i$  с  $Q > 0$  (аннигиляция позитрона):



$$\varepsilon_i = \varepsilon_{in} - (h\nu_1 + h\nu_2 + h\nu_k + E_{A,1} + E_{A,2}) + 2m_0c^2$$

## 2.3 Дозиметрические величины: основы

### 2.3.2 Основы процесса поглощения энергии

#### Определение переданной энергии

- ❑ Термин "переданная энергия" относится к **маленькому объему**.
- ❑ Энергия, переданная среде в данном объеме,  $\varepsilon$ , есть **сумма всех энергий, внесенных** в этот объем, т.е. сумма энергий, переданных во всех основных процессах взаимодействия, которые произошли в данном объеме в рассматриваемом временном интервале:

$$\varepsilon = \sum_i \varepsilon_i$$

где суммирование ведется по всем энергиям  $\varepsilon_i$ , переданным в данном объеме.

- ❑ **Пример:** В результате действия излучения в детекторе возникает сигнал  $M$ , который фактически соответствует энергии, переданной в объеме детектора.

## 2.3 Дозиметрические величины: основы

### 2.3.4 Поглощение энергии и передача энергии

(1) Что понимается под "поглощением энергии" ?

Термин поглощение энергии относится к **заряженным частицам**, т.е., электронам, протонам, и т.д.

Мы знаем, что электроны взаимодействуют двумя способами:

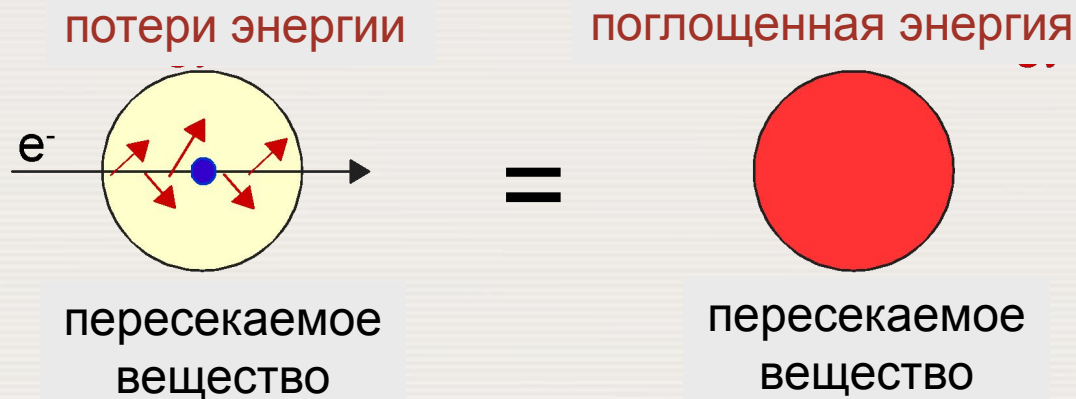
- ❑ Кулоновское взаимодействие с ядром – результат: тормозное излучение (тормозная способность на излучение)
- ❑ Кулоновское взаимодействие с орбитальным электроном – результат: ионизация и возбуждение атома (тормозная способность на столкновения). **Только эта компонента подразумевает поглощение энергии.**

## 2.3 Дозиметрические величины: основы

### 2.3.4 Поглощение энергии и передача энергии

(2) Что понимается под "поглощением энергии" ?

- Энергия, потерянная налетающим электроном при столкновении, одновременно поглощается атомом вещества и, соответственно, веществом.



- Процесс поглощения энергии заряженных частиц в веществе описывается потерями энергии на столкновения (тормозная способность на столкновения).

## 2.3 Дозиметрические величины: основы

### 2.3.4 Поглощение энергии и передача энергии

(1) Что в реальности понимается под "передачей энергии" ?

Термин передача энергии относится к незаряженным частицам, т.е., к фотонам, нейтронам, и т. д.

Мы знаем что:

- Судьба фотона после взаимодействия с атомом зависит от двух сценариев:
  - Фотон исчезает (т.е. полностью поглощается) и часть его энергии передается легким заряженным частицам (электронам и позитронам поглощающей среды).
  - Фотон рассеивается и два сценария возможны:
    - Возникающий фотон имеет ту же энергию что и налетающий фотон, и поэтому легких заряженных частиц при взаимодействии не образуется.
    - Рассеянный фотон имеет меньшую энергию, чем налетающий фотон и избыток энергии передается легким заряженным частицам (электрону).

## 2.3 Дозиметрические величины: основы

### 2.3.4 Поглощение энергии и передача энергии

(2) Что в реальности понимается под "передачей энергии" ?

- Энергия, которая передается при фотонном взаимодействии легким заряженным частицам (в основном вторичным электронам поглощающей среды), называется переданной энергией.
- Этот процесс характеризуется коэффициентом передачи энергии:

$$\mu_{tr} = \mu \frac{\bar{E}_{tr}}{h\nu}$$



где -  $\bar{E}_{tr}$  средняя энергия, переданная первичным фотоном с энергией  $h\nu$  и превращенная в кинетическую энергию заряженных частиц (электроны и позитроны).



## 2.3 Дозиметрические величины: основы

### 2.3.4 Поглощение энергии и передача энергии

Соотношение между "передачей энергии " и "поглощением энергии "

- Для заряженных частиц основная доля потерянной энергии поглощается  поглощение энергии
- Для незаряженных частиц, энергия первоначально передается вторичным заряженным частицам  передача энергии .

Затем вторичные заряженные частицы теряют свою энергию в соответствии с законами для заряженных частиц (снова поглощение энергии).

Энергия незаряженных частиц (фотонов, нейтронов) , передается веществу в два этапа.

## 2.4 ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

### 2.4.1 Керма

- ❑ Керма - акроним для **K**inetic **E**nergy **R**elaxed per unit **M**Ass.
- ❑ Керма характеризует **среднюю кинетическую энергию**, переданную в маленьком **объеме** косвенно ионизирующим излучением заряженным частицам, безотносительно того, что происходит после этой передачи.

$$K = \frac{d\bar{E}_{tr}}{dm}$$

- ❑ Единица кермы (Дж/кг).
- ❑ Эта единица называется Грей, при этом  $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$ .
- ❑ Керма характеризует **косвенно ионизирующее** излучение – фотоны и нейтроны.

## 2.4 ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

### 2.4.1 Керма

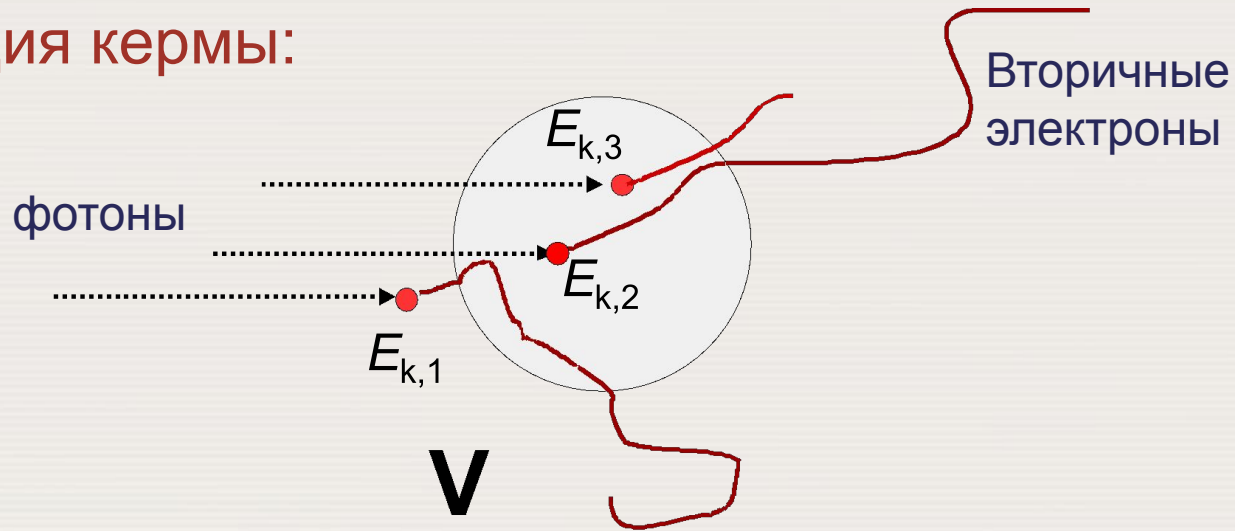
- Энергия, переданная фотонами, может быть израсходована двумя путями:
  - В столкновениях с электронами (мягкие и жесткие столкновения);
  - В радиационных взаимодействиях (тормозное излучение и аннигиляция).
  
- Поэтому, полная керма может быть разделена на две компоненты:
  - Керма на столкновения -  $K_{col}$
  - Керма на излучение -  $K_{rad}$

$$K = K_{col} + K_{rad}$$

## 2.4 ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

### 2.4.1 Керма

Иллюстрация кермы:



Энергия, переданная в результате столкновений в  $V$ :  $E_{tr} = E_{k,2} + E_{k,3}$   
где  $E_k$  - кинетическая энергия вторичных электронов.

**Примечание:**  $E_{k,1}$  передается **вне объема** и поэтому не принимается во внимание при определении кермы.

## 2.4 ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

### 2.4.2 Сема

- Подобно керме, сема  $C$  – это акроним для **C**onverted **E**nergy per unit **M**Ass.
- Сема характеризует **среднее количество энергии**, переданное в маленьком объеме вещества ионизирующим излучением (протоны или электроны) за счет столкновений с атомарными электронами безотносительно того, что происходит после этой передачи.

$$C = \frac{d\bar{E}_c}{dm}$$

Единица семы (Дж/кг).

Эта единица называется Грей, при этом  $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$ .

## 2.4 ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

### 2.4.2 Сема

Отличие **Семы** от **кермы** в следующем:

- ❑ Сема имеет дело с энергией, потерянной **налетающими частицами** в столкновениях с электронами.
- ❑ Керма имеет дело с энергией, переданной **вылетающим частицам**.

## 2.4 ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

### 2.4.3 Поглощенная доза

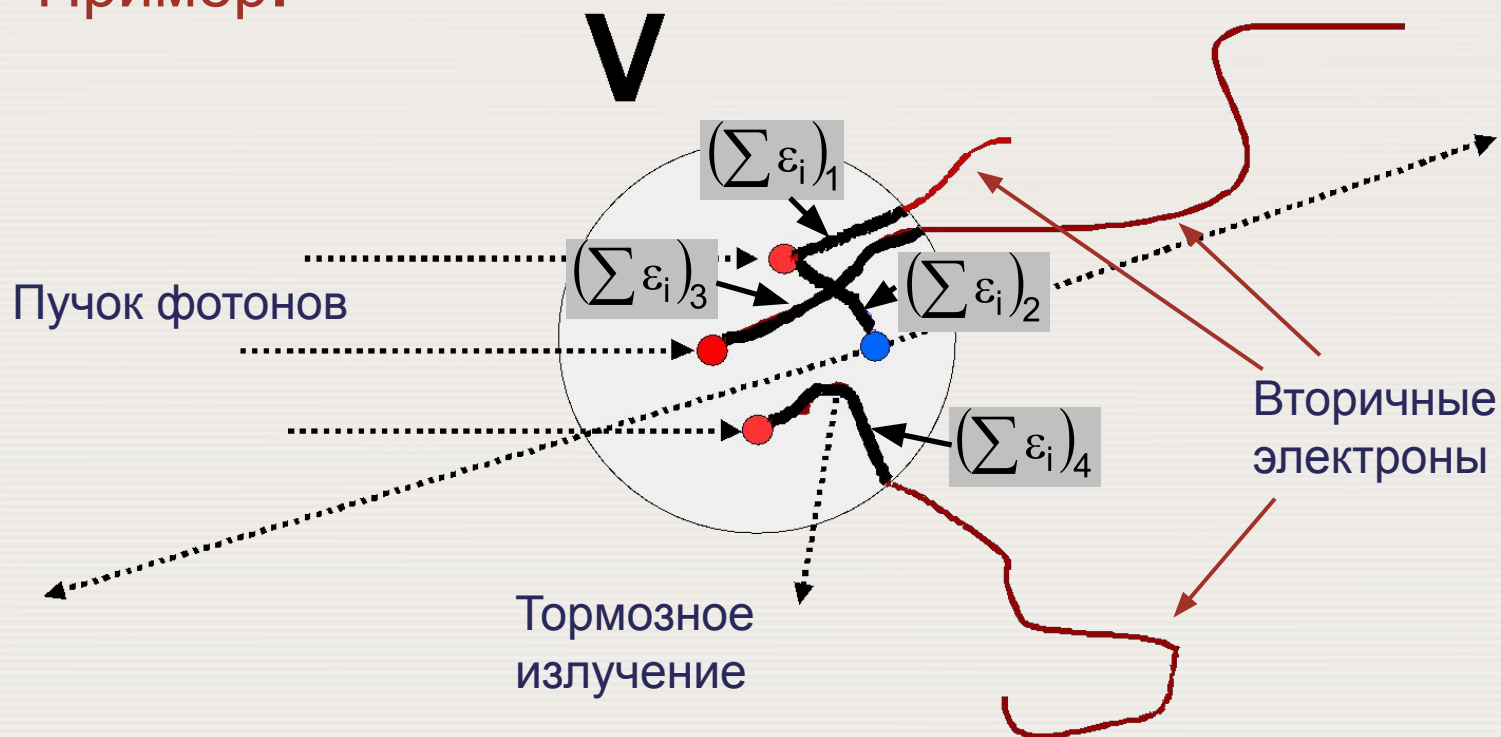
- Поглощенная доза является величиной, которая применима к непосредственно ионизирующему и к косвенно ионизирующему излучениям.
- **Косвенно ионизирующее** излучение подразумевает, что энергия передается веществу в два этапа.
  - Сначала (результатом является керма), косвенно ионизирующее излучение преобразует свою энергию в энергию вторичных заряженных частиц.
  - Затем эти заряженные частицы передают большую часть своей кинетической энергии веществу (результатом является поглощенная доза).
- **Непосредственно ионизирующее** излучение подразумевает, что заряженные частицы передают большую часть своей кинетической энергии непосредственно веществу (результатом является поглощенная доза).



## 2.4 ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

### 2.4.3 Поглощенная доза

Пример:



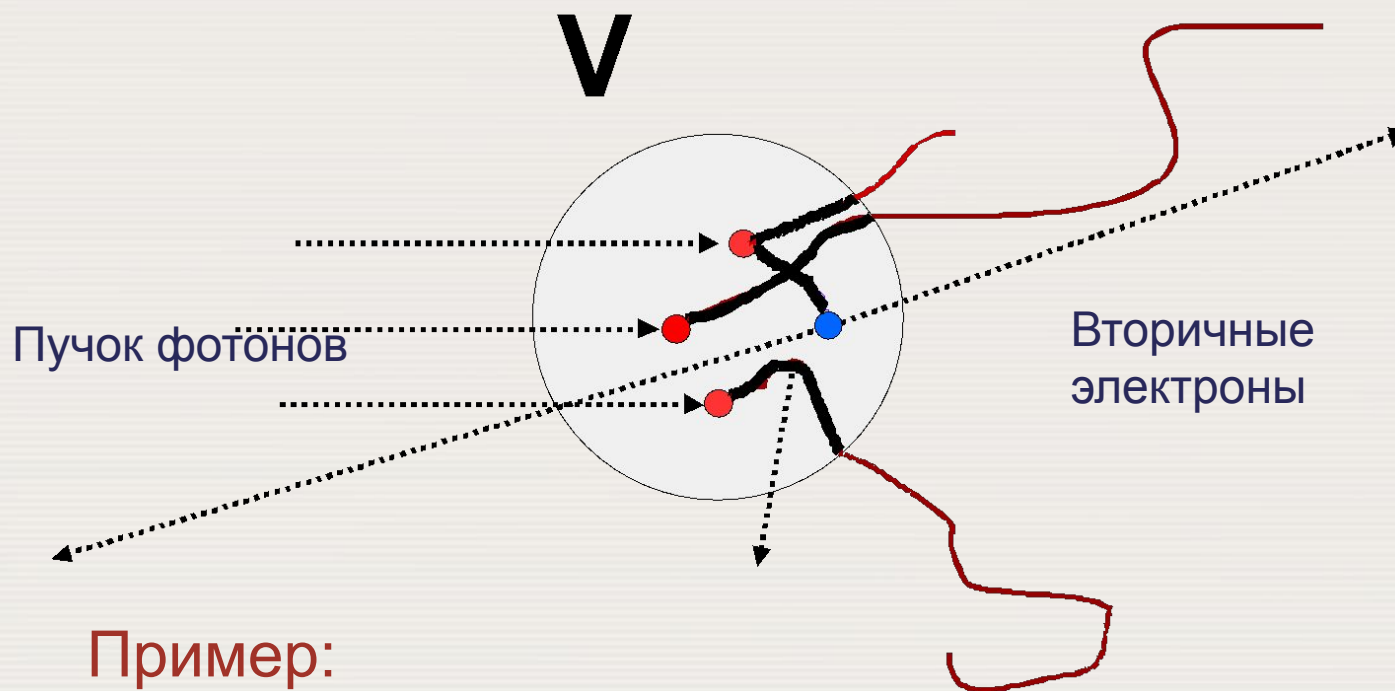
Энергия, поглощенная в  $V = (\sum \varepsilon_i)_1 + (\sum \varepsilon_i)_2 + (\sum \varepsilon_i)_3 + (\sum \varepsilon_i)_4$

где  $(\sum \varepsilon_i)$  - есть сумма энергий, затраченных на столкновения вдоль трека заряженной частицы в **объеме V**.



## 2.4 ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

### 2.4.3 Поглощенная доза



#### Пример:

Так как электроны перемещаясь в веществе передают энергию вдоль трека, поглощение энергии ( $= \text{—}$ ) не происходит в том же месте, где энергия передается - керма ( $= \bullet$ ).

## 2.4 ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

### 2.4.3 Поглощенная доза

□ Поглощенная доза  $D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}$

$\bar{\varepsilon}$  - средняя энергия, переданная ионизирующим излучением веществу, находящемуся в элементарном объеме

$dm$  - масса вещества в этом объеме

□ Единица поглощенной дозы - Дж/кг.

□ Эта единица называется Грей, при этом  $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$ .



## 2.5 КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ: ЭЛЕКТРОНЫ

- Так как **дозиметрические величины** могут также быть определены как произведение:

радиационная величина × массовый коэффициент взаимодействия  $\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]$

то этот подход требует изучения коэффициентов взаимодействия излучения.

## 2.5 КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ: ЭЛЕКТРОНЫ

### 2.5.2 Электроны: тормозные способности для заряженных частиц

- Потери энергии падающего электрона могут быть представлены:

полной линейной тормозной способностью  $S_{\text{tot}}$

которая представляет собой изменение кинетической энергии электрона  $E_K$  на единице длины  $x$ :

$$S_{\text{tot}} = \frac{dE_K}{dx} \quad \text{MeV/cm}$$

## 2.5 КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ: ЭЛЕКТРОНЫ

### 2.5.3 Массовая тормозная способность

- Разделив выражение на плотность среды, можно практически исключить зависимость массовой тормозной способности от массовой плотности.
- Полная массовая тормозная способность  $(S/\rho)_{\text{tot}}$  определяется как линейная тормозная способность, деленная на плотность вещества:

$$\left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{tot}} = \frac{1}{\rho} \frac{dE_K}{dx} \text{ в MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{г}$$

## 2.5 КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ: ЭЛЕКТРОНЫ

### 2.5.3 Массовая тормозная способность

□ Полная массовая тормозная способность  $(S / \rho)_{\text{tot}}$  состоит из двух компонент:

- Массовая тормозная способность на столкновения  $(S / \rho)_{\text{col}}$  является результатом ионизации и возбуждения атома
- Массовая тормозная способность на излучение  $(S / \rho)_{\text{rad}}$  является результатом взаимодействия с ядром и, вследствие чего, происходит испускание тормозного излучения.

$$\left( \frac{S}{\rho} \right)_{\text{tot}} = \left( \frac{S}{\rho} \right)_{\text{col}} + \left( \frac{S}{\rho} \right)_{\text{rad}}$$

## 2.5 КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ: ЭЛЕКТРОНЫ

### 2.5.3 Массовая тормозная способность

- ❑ Тормозные способности обычно рассчитывают теоретически, и измеренные данные практически отсутствуют.
- ❑ Тормозные способности для мягких столкновений обычно рассчитывают по теории Бете.
- ❑ Энергии, переданные в мягких столкновениях, комбинируют с таковыми для жестких столкновений используя теорию Мольера (для электронов) и сечения Бхабба (для позитронов), полученные для свободных электронов.
- ❑ Значения полных массовых тормозных способностей для электронов и позитронов приведены в докладе МКРЕ 37.

## 2.6 КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ: ФОТОНЫ

- Энергия, которая передается при фотонном взаимодействии легкой заряженной частице (как правило вторичному электрону), называется переданная энергия.
- Процесс передачи энергии описывается коэффициентом передачи энергии:

$$\mu_{tr} = \mu \frac{\bar{E}_{tr}}{h\nu}$$

где  $\bar{E}_{tr}$  - средняя энергия, переданная налетающим фотоном с энергией  $h\nu$  заряженным частицам ( $e^-$  и  $e^+$ ).



## 2.6 КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ: ФОТОНЫ

### Напоминание:

- ❑ Небольшая часть энергии, которая передается при фотонном взаимодействии легкой заряженной частице приводит к тому, что:
  - Вторичные заряженные частицы по мере замедления взаимодействуют с ядрами вещества и образуются фотоны.
  - Результатом этих взаимодействий заряженных частиц с ядрами вещества как правило является образование тормозного излучения.
- ❑ Эта потеря энергии через процесс излучения характеризуется специальным коэффициентом  $\bar{g}$ .
- ❑ Оставшаяся энергия поглощается. Этот процесс можно характеризовать коэффициентом поглощения энергии  $\mu_{\text{en}}$  (или  $\mu_{\text{ab}}$ )

$$\mu_{\text{en}} = \mu_{\text{tr}} (1 - \bar{g})$$

## 2.7 ВЗАИМООТНОШЕНИЕ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

### 2.7.1 Флюенс энергии и керма (фотоны)

- Полная керма  $K$  в некоторой точке среды для моноэнергетического пучка :

$$K = \frac{d\bar{E}_{tr}}{dm}$$

связана с флюенсом частиц  $\Psi$  в этой же точке среды как:

$$K = \Psi \cdot \frac{\mu_{tr}}{\rho}$$

где  $(\mu_{tr}/\rho)$  – массовый коэффициент передачи энергии для моноэнергетического пучка фотонов в среде.

## 2.7 ВЗАИМООТНОШЕНИЕ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

### 2.7.1 Флюенс энергии и керма (фотоны)

- Керма на столкновения  $K_{\text{col}}$  в некоторой точке среды для моноэнергетического пучка:

$$K_{\text{col}} = K \cdot (1 - \bar{g})$$

связана с флюенсом частиц  $\Psi$  в этой же точке среды как:

$$K_{\text{col}} = \Psi \cdot \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}$$

где  $(\mu_{\text{en}}/\rho)$  – массовый коэффициент поглощения энергии для моноэнергетического пучка фотонов в среде.

## 2.7 ВЗАИМООТНОШЕНИЕ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

### 2.7.1 Флюенс энергии и керма (фотоны)

- Если сравнить керму на столкновения для вещества 1 и для вещества 2, при одном и том же флюенсе энергии  $\Psi$ , то можно получить полезное соотношение:

$$\frac{K_{\text{col},2}}{K_{\text{col},1}} = \frac{\Psi \cdot \left( \frac{\bar{\mu}_{\text{en}}}{\rho} \right)_2}{\Psi \cdot \left( \frac{\bar{\mu}_{\text{en}}}{\rho} \right)_1} = \left( \frac{\bar{\mu}_{\text{en}}}{\rho} \right)_{2,1}$$

## 2.7 ВЗАИМООТНОШЕНИЕ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

### 2.7.1 Флюенс энергии и керма (электроны)

- Поглощенная доза в веществе  $D_{med}$  связана с флюенсом электронов  $\Phi_{med}$  в веществе как:

$$D_{med} = \Phi_{med} \cdot \left( \frac{S_{col}}{\rho} \right)_{med}$$

где  $(S_{col}/\rho)_{med}$  - тормозная способность на столкновения в веществе при данной энергии электрона.

- Это соотношение справедливо при следующих условиях:
  - Испущенные фотоны покидают рассматриваемый объем
  - Вторичные электроны поглощаются в месте образования,
  - Или в объеме существует электронное равновесие

## 2.7 ВЗАИМООТНОШЕНИЕ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

### 2.7.1 Флюенс энергии и керма (электроны)

- Если сравнить поглощенную дозу для вещества 1 и для вещества 2, при одном и том же флюенсе:

$$\Phi_{\text{med1}} = \Phi_{\text{med2}},$$

ТО МОЖНО ПОЛУЧИТЬ ПОЛЕЗНОЕ СООТНОШЕНИЕ:

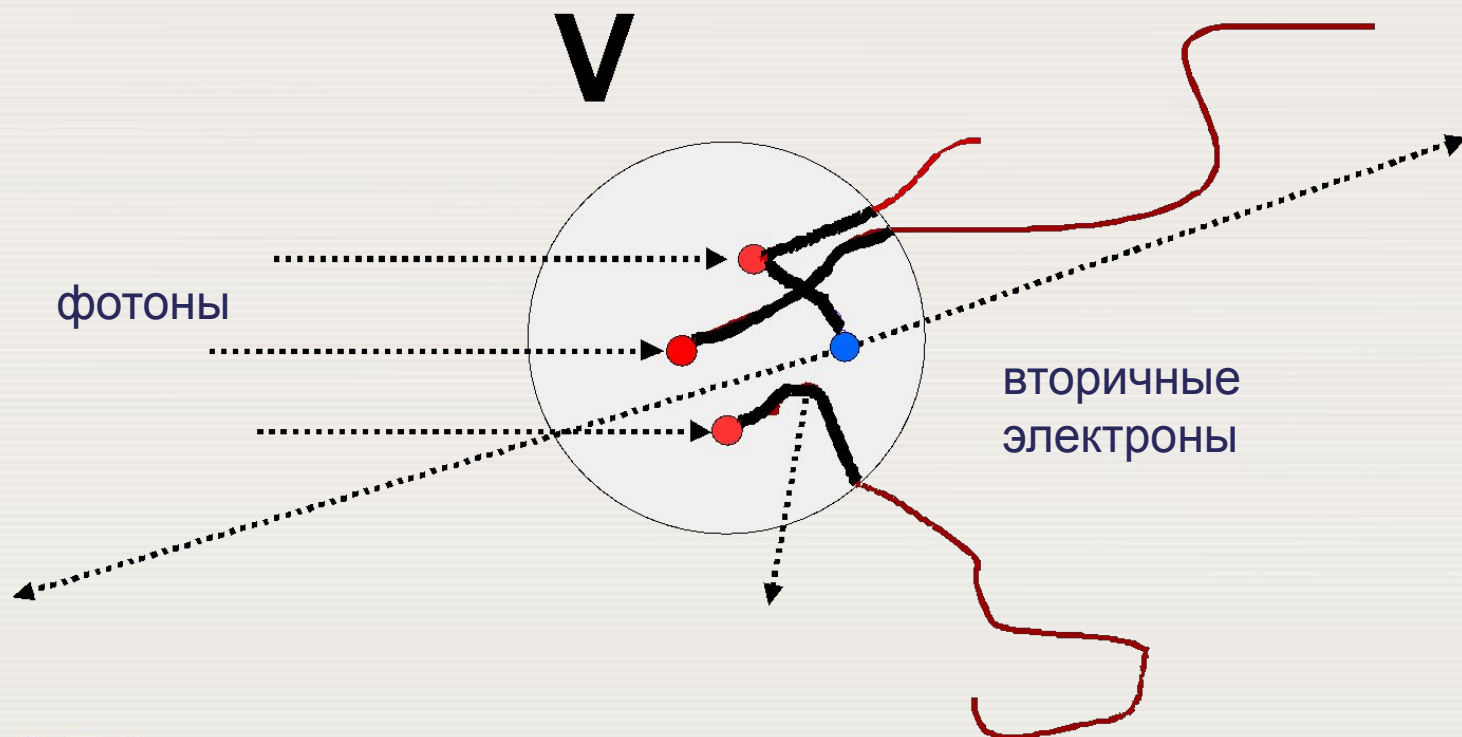
$$\frac{D_{\text{med}_2}}{D_{\text{med}_1}} = \frac{\Phi_{\text{med}_2} \cdot \left( \frac{\bar{S}_{\text{col}}}{\rho} \right)_{\text{med}_2}}{\Phi_{\text{med}_1} \cdot \left( \frac{\bar{S}_{\text{col}}}{\rho} \right)_{\text{med}_1}} = \left( \frac{\bar{S}_{\text{col}}}{\rho} \right)_{\text{med}_2, \text{med}_1}$$

## 2.7 ВЗАИМООТНОШЕНИЕ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

### 2.7.2 Керма и доза (электронное равновесие)

Что мы уже знаем:

Так как электроны отдают свою энергию при движении вдоль трека, то поглощение энергии (=  $\text{—}$ ) не происходит в том же месте, где происходит передача энергии, описываемая кермой (=  $\bullet$ ).



## 2.7 ВЗАИМООТНОШЕНИЕ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

### 2.7.2 Керма и доза (электронное равновесие)

- Так как образованные фотоны как правило покидают рассматриваемый объем, то **поглощенную дозу** можно соотнести с **кермой на столкновения**.
- Вторичные электроны, образованные при взаимодействии фононов, имеют конечный пробег, поэтому энергия может переноситься за пределы рассматриваемого объема. Отсюда следует, что:

$$K_{\text{col}} \neq D$$

- Отношение дозы к керме на столкновения записывают как:

$$\beta = D / K_{\text{col}}$$

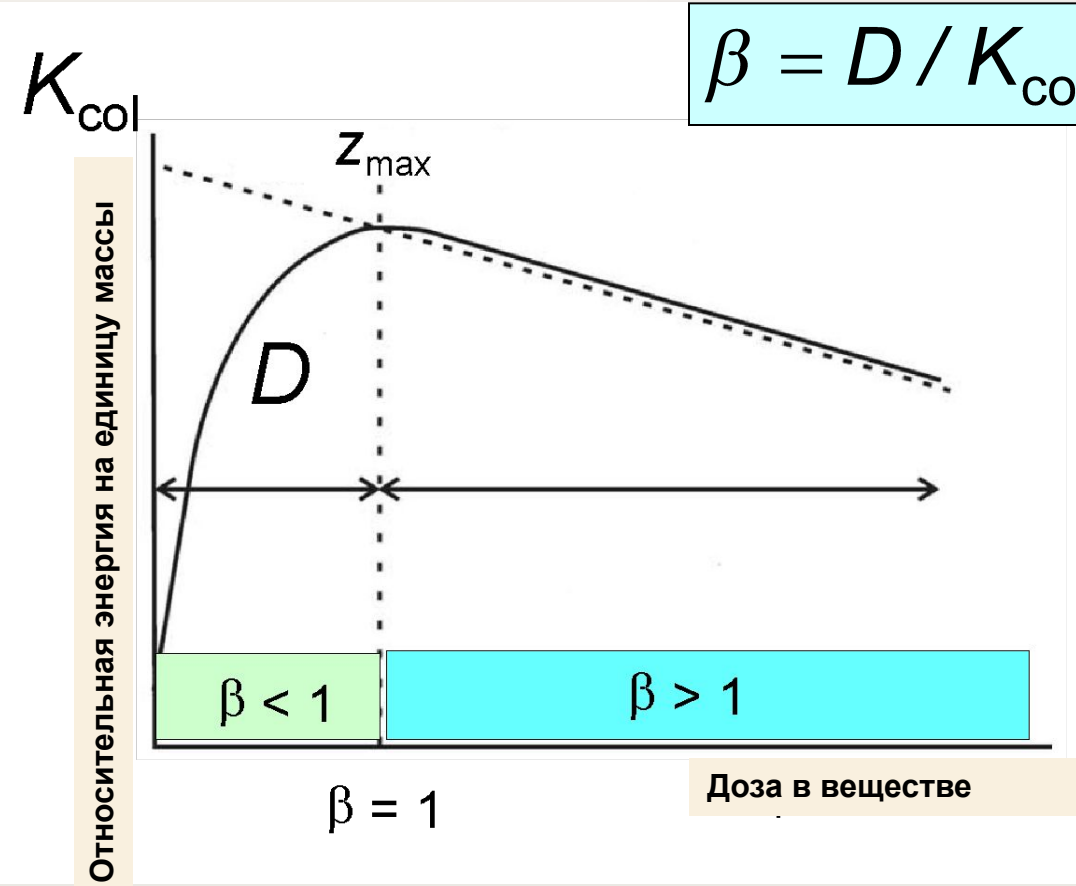


# 2.7 ВЗАИМООТНОШЕНИЕ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

## 2.7.2 Керма и доза (электронное равновесие)

### Соотношение между кермой на столкновения и поглощенной дозой в веществе

$$\beta = D / K_{col}$$



В области накопления  $\beta < 1$

В области переходного электронного равновесия :  $\beta > 1$

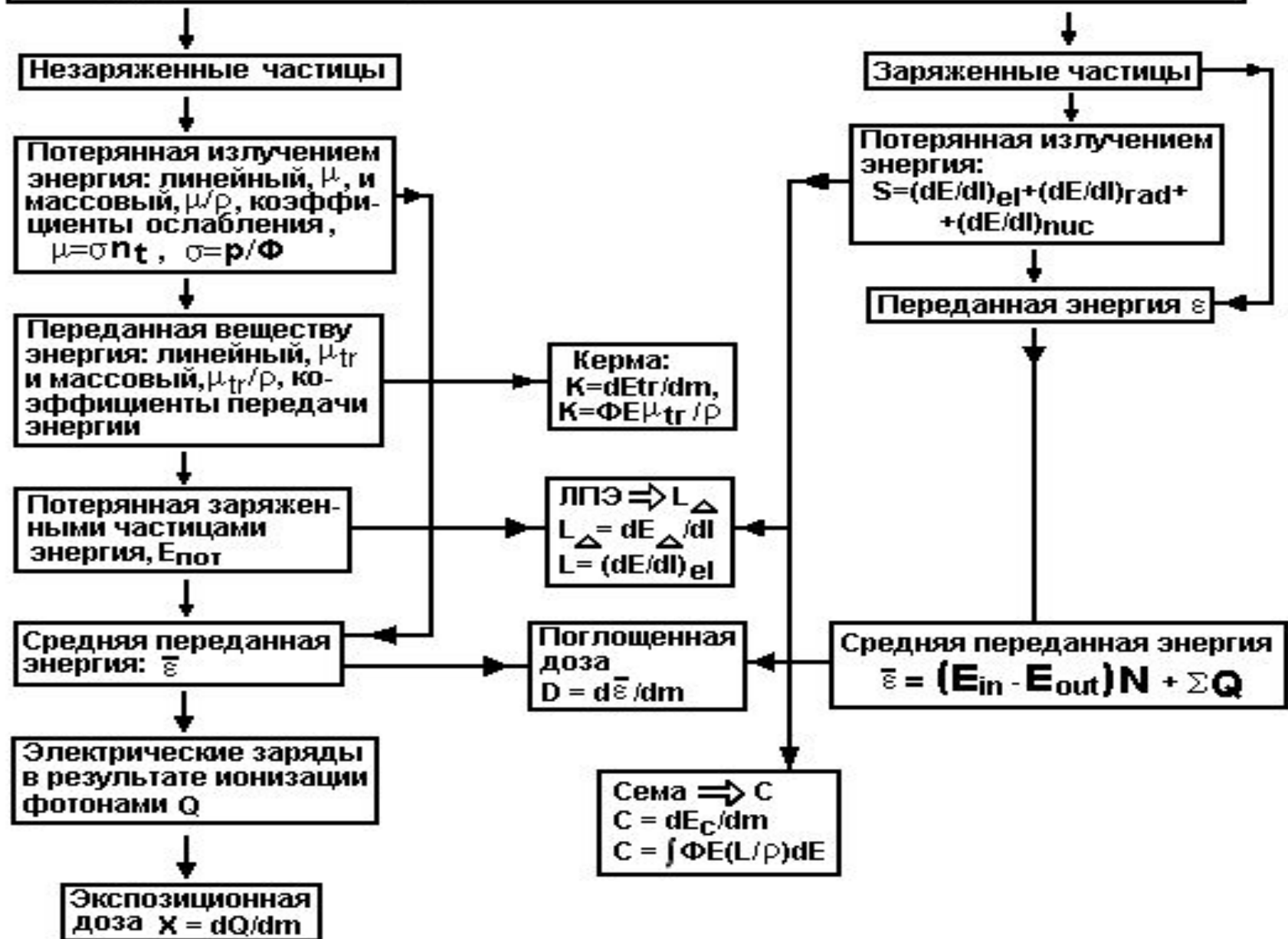
На глубине  $z = z_{max}$ , существует электронное равновесие.

$\beta = 1$

$$D = K_{col} = K(1 - \bar{g})$$

Поле излучения: энергетическое распределение угловой мощности флюенса

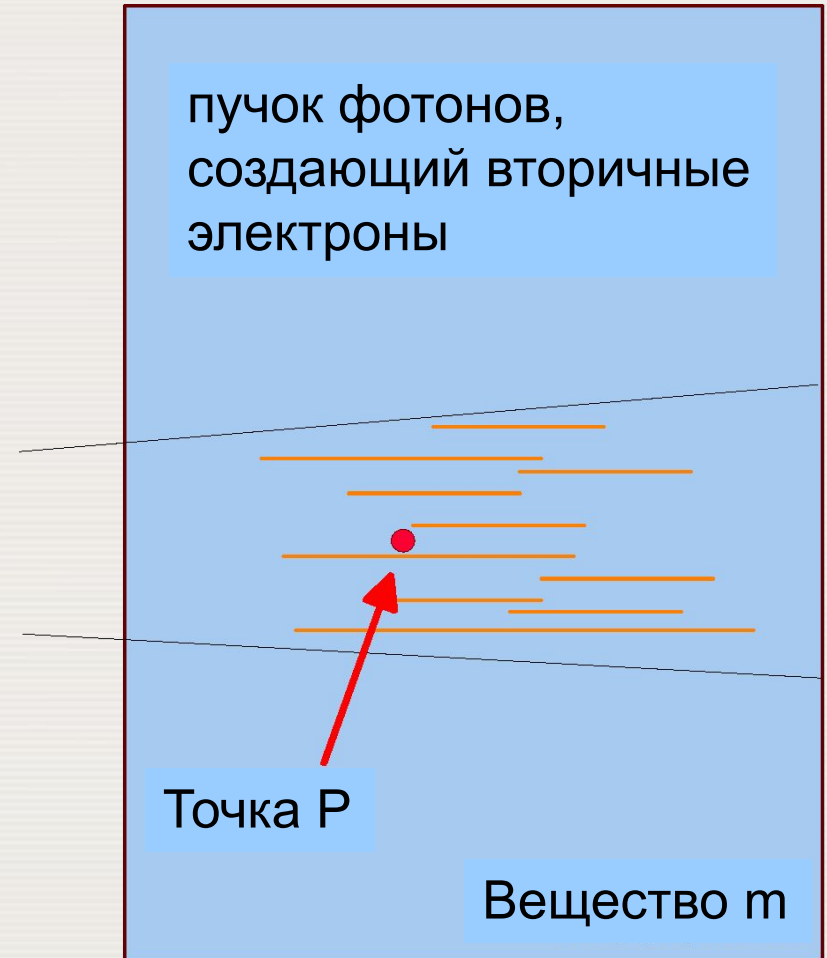
$$\dot{\Phi}_{\Omega, E} = d\dot{\Phi}_{\Omega} / dE = d^4 N / dadtd\Omega dE$$



## 2.8 ТЕОРИЯ ПОЛОСТИ

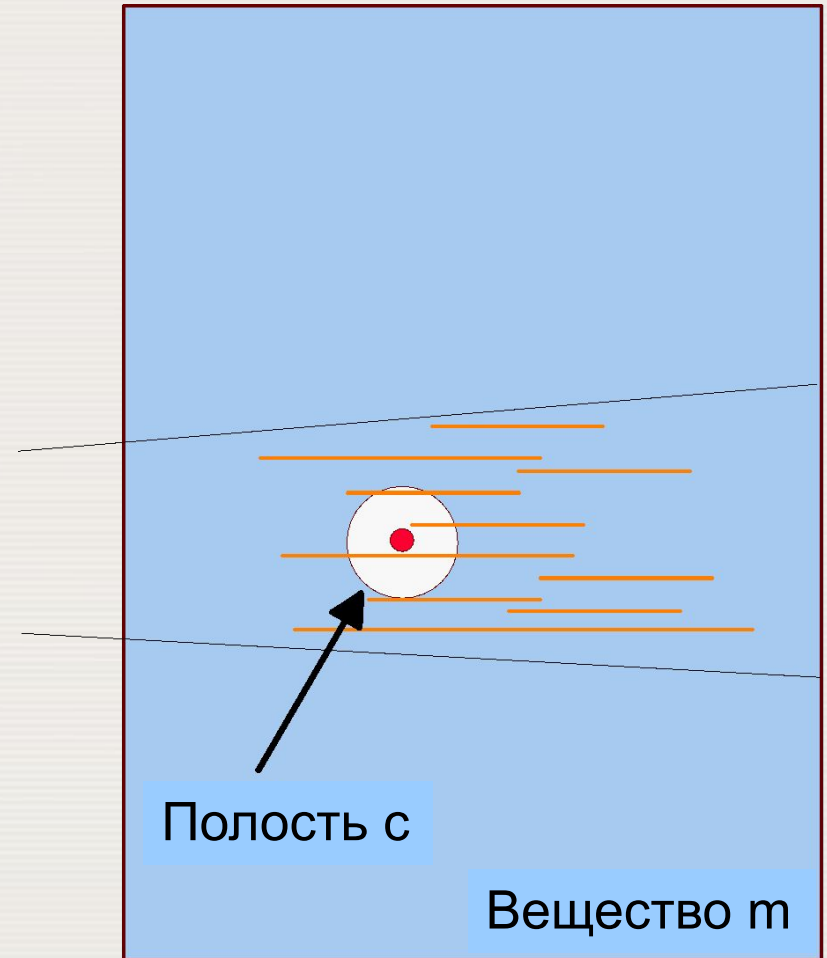
- Рассмотрим точку  $P$  в веществе  $m$  внутри пучка фотонов.
- Поглощенная доза в точке  $P$  может быть найдена из соотношения :

$$D_{\text{med}}(P) = \Phi \cdot \left( \frac{\bar{S}}{\rho} \right)_{\text{med}}$$



## 2.8 ТЕОРИЯ ПОЛОСТИ

- Чтобы **измерить** поглощенную дозу в точке  $P$  в веществе, необходимо поместить в эту точку среды прибор, чувствительный к излучению (дозиметер).
- Чувствительная часть дозиметера часто называют **ПОЛОСТЬЮ**.
- Вообще говоря, материал полости не всегда совпадает с материалом вещества, куда помещена полость.



## 2.8 ТЕОРИЯ ПОЛОСТИ

- Поглощенную дозу в полости,  $D_{\text{cav}}$  можно измерить, а так же рассчитать:

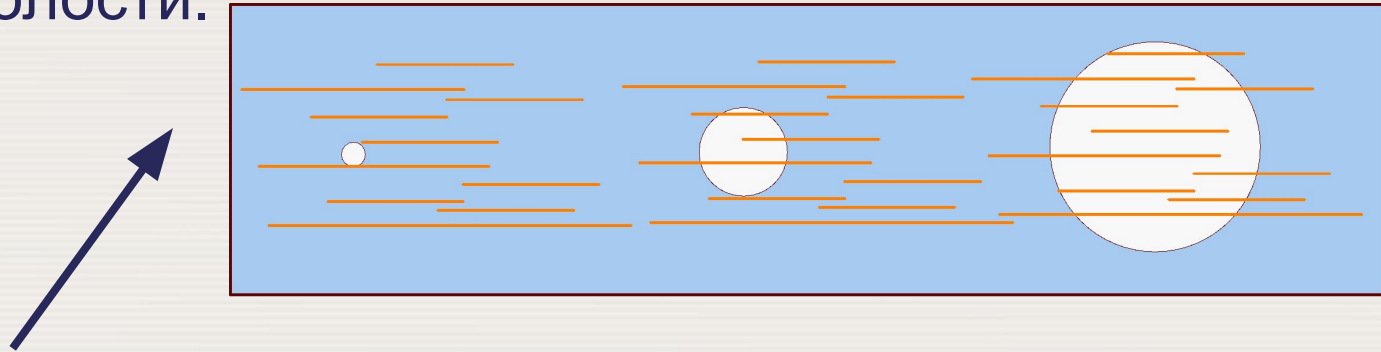
$$D_{\text{cav}} = \int_{V_{\text{cav}}} \int_{E=0}^{E_{\text{max}}} \Phi_{E,r}(E,r) \frac{S_{\text{cav}}(E)}{\rho} dE dr$$

- Если материал полости отличается от материала вещества по плотности и атомному номеру, измеренная поглощенная доза в полости будет отличаться от поглощенной дозы в веществе в точке P.

$$D_{\text{cav}} \neq D_{\text{med}}(P)$$

## 2.8 ТЕОРИЯ ПОЛОСТИ

- Размеры полостей классифицируются как **маленькие, средние или большие** по сравнению с пробегами вторичных заряженных частиц, созданных фотонами в полости.



- Когда пробег вторичных заряженных частиц, (электронов) значительно больше размера полости (т.е., когда полость классифицируется как маленькая), этот случай представляет специальный интерес.

## 2.8 ТЕОРИЯ ПОЛОСТИ

### 2.8.1 Теория полости Брэгга-Грэя

- Теория полости Брэгга-Грэя (Б-Г) была первой теорией, разработанной для обоснования соотношения между дозой, поглощенной в дозиметре, и дозой, поглощенной в веществе, содержащем дозиметер.
  
- Теория полости Б-Г основана на двух условиях:
  - **Условие (1):**  
Полость должна быть мала по сравнению с пробегом заряженных частиц падающих на нее, как что наличие полости не возмущает флюенс заряженных частиц в веществе.
  - **Условие (2):**  
Поглощенная доза в полости создается исключительно теми электронами, которые пересекают полость.



## 2.8 ТЕОРИЯ ПОЛОСТИ

### 2.8.1 Теория полости Брэгга-Грэя

- Следствием (1) является то, что потоки электронов не изменяются и соответствуют равновесному флюенсу, установившемуся в среде.
  
- Однако:
  - Это условие справедливо для области **электронного равновесия** или области **переходного электронного равновесия**
  - Наличие полости всегда приводит к некоторому **возмущению флюенса частиц**, что требует введения коэффициента, корректирующего эффект возмущения.



## 2.8 ТЕОРИЯ ПОЛОСТИ

### 2.8.1 Теория полости Брэгга-Грэя

- Условие (2) подразумевает что:
  - Вкладом фотонных взаимодействий в полости можно пренебречь.
  - Все электроны, дающие вклад в дозу в полости, созданы вне полости. Они **пересекают всю полость целиком и называются кроссеры**.
  - Внутри полости не образуется вторичных электронов (стартеры) и нет электронов, останавливающихся в полости (стопперы).

## 2.8 ТЕОРИЯ ПОЛОСТИ

### 2.8.1 Теория полости Брэгга-Грэя

- Если предположить, что энергия кроссеров не изменяется в пределах объема маленькой воздушной полости, тогда поглощенная доза в полости полностью определяется вкладом кроссеров:

$$D_{\text{cav}} = \int_{E_k=0}^{E_{k0}} \Phi_{E_k}(E_k) \cdot \frac{S(E_k)}{\rho} dE_k$$

где:  $E_k$  - кинетическая энергия кроссеров.

$E_{k0}$  - максимальная энергия электронов, равная исходной энергии вторичных электронов, созданных фотонами.

$\Phi_E(E_k)$  - спектр энергии кроссеров.



## 2.8 ТЕОРИЯ ПОЛОСТИ

### 2.8.1 Теория полости Брэгга-Грэя

- Используя упрощенное обозначение, имеем дозу в полости:

$$D_{\text{cav}} = \Phi \cdot \left( \frac{\bar{S}}{\rho} \right)_{\text{cav}}$$

- В веществе без полости :

$$D_{\text{med}}(P) = \Phi \cdot \left( \frac{\bar{S}}{\rho} \right)_{\text{med}}$$

- Из того что  $\Phi$  идентичен (не возмущен), следует что:

$$D_{\text{med}}(P) = D_{\text{cav}} \cdot \left( \frac{\bar{S}}{\rho} \right)_{\text{med}} / \left( \frac{\bar{S}}{\rho} \right)_{\text{cav}} = D_{\text{cav}} \cdot \left( \frac{\bar{S}}{\rho} \right)_{\text{med,cav}}$$

## 2.8 ТЕОРИЯ ПОЛОСТИ

### 2.8.6 Отношение тормозных способностей

- Для фотонов и электронов высоких энергий отношение тормозных способностей определяется как:

$$S_{\text{med1,med2}} = \left( \frac{\bar{S}}{\rho} \right)_{\text{med1}} / \left( \frac{\bar{S}}{\rho} \right)_{\text{med2}}$$

Эта величина является важным связующим звеном в процессе определения поглощенной дозы в веществе med1 с помощью дозиметра изготовленного из вещества med2.

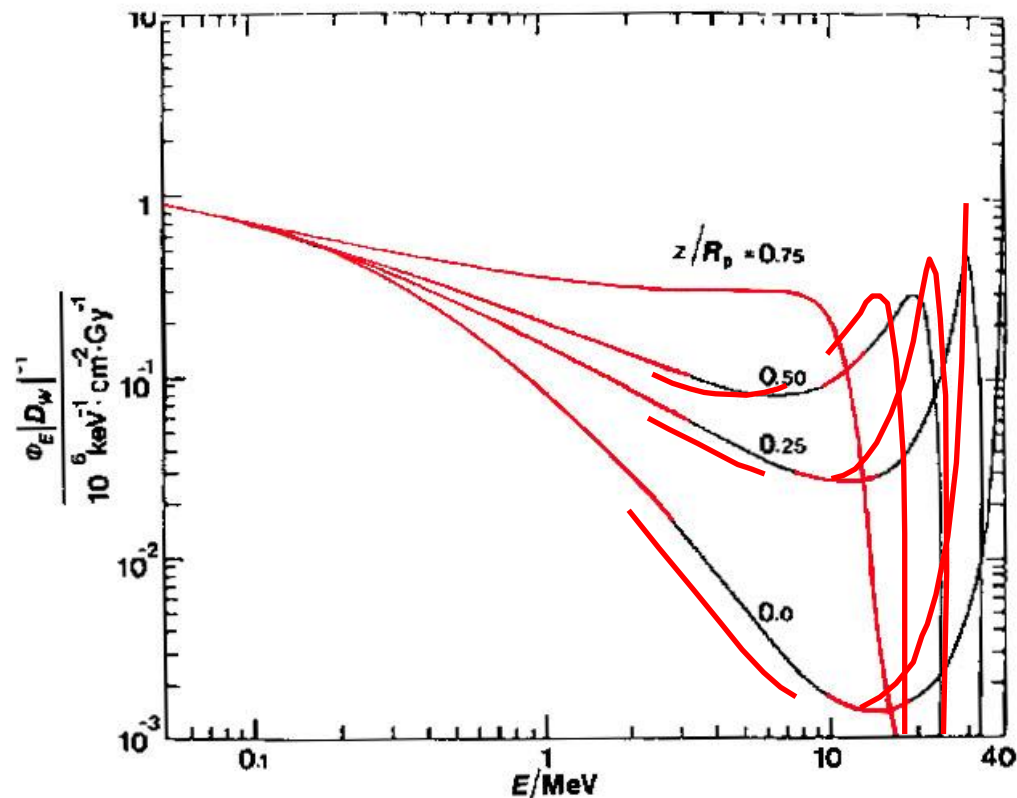
## 2.8 ТЕОРИЯ ПОЛОСТИ

### 2.8.6 Отношение тормозных способностей

- Это соотношение необходимо учитывать при проведении **относительных** измерений поглощенной дозы в фантоме, где энергия электронов претерпевает существенные изменения.

Пример из доклада МКРЕ 35:

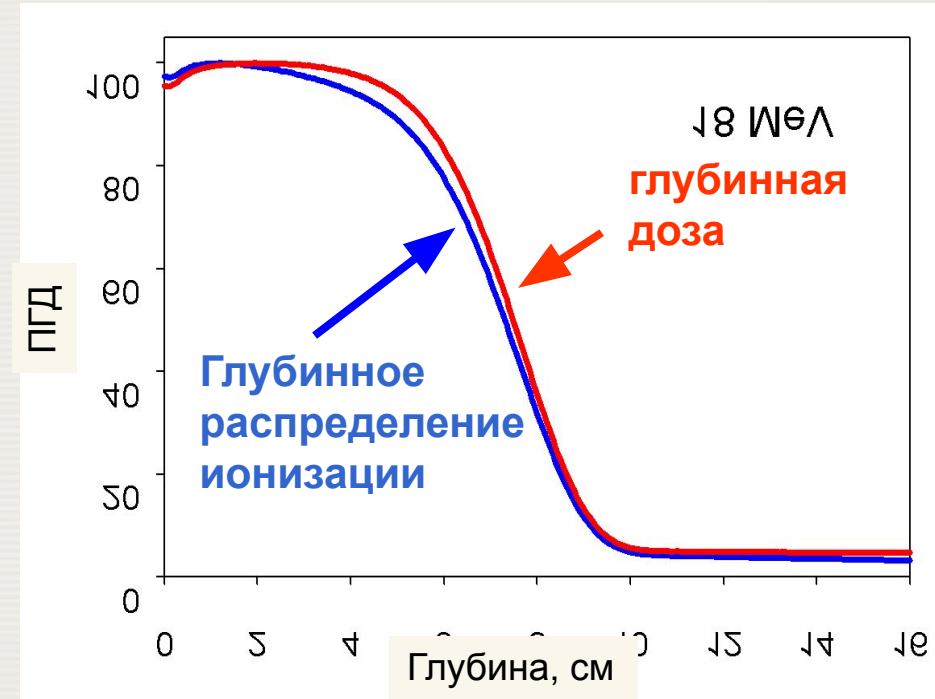
Энергетический спектр электронов с начальной энергией 40 МэВ в водном фантоме на **различных глубинах  $z$**  (в единицах  $z/R_p$ ) Спектр нормирован на значение при энергии 40 МэВ на поверхности .



## 2.8 ТЕОРИЯ ПОЛОСТИ

### 2.8.6 Отношение тормозных способностей

- Изменение сигнала с ионизационной камеры с глубиной фантома дает в результате **глубинное распределение ионизации**.
- **Глубинное распределение ионизации** электронного пучка отличается от **распределения глубинной дозы** на величину отношения тормозных способностей воды и воздуха.



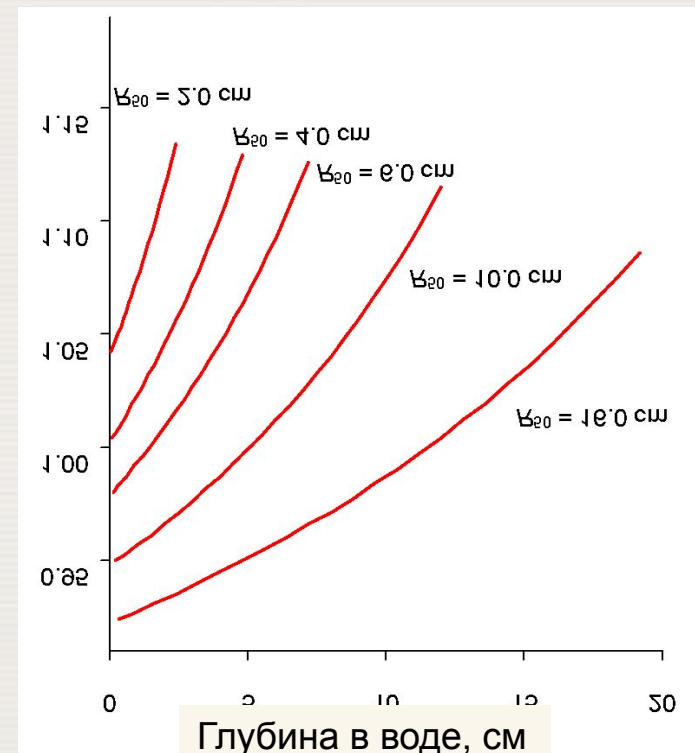
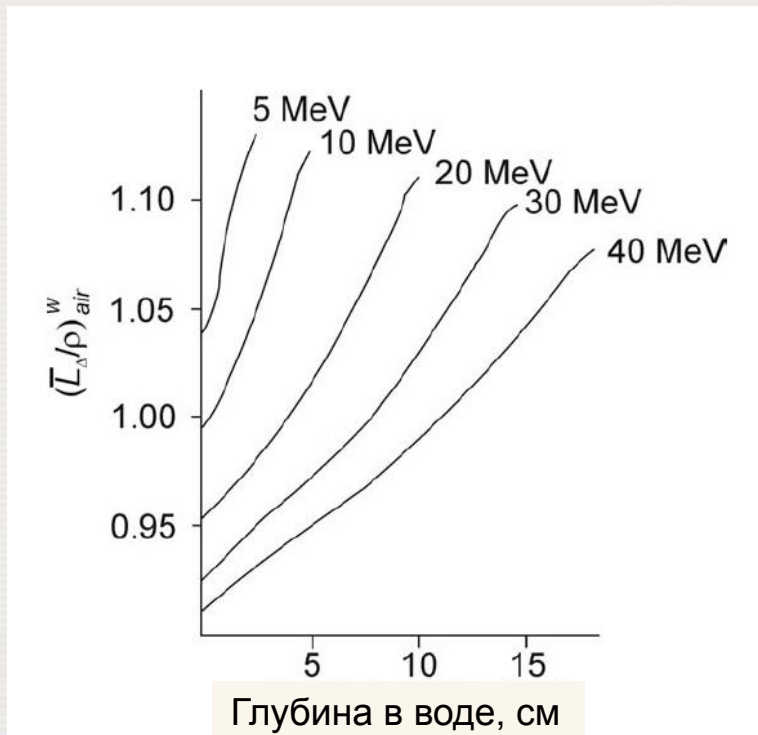
## 2.8 ТЕОРИЯ ПОЛОСТИ

### 2.8.6 Отношение тормозных способностей

Отношение ограниченных тормозных способностей ( $\Delta = 10$  кэВ) воды и воздуха для электронных пучков как функция глубины в воде (из TRS 398).

Для моноэнергетических электронов

Для реальных пучков



## 2.8 ТЕОРИЯ ПОЛОСТИ

### 2.8.6 Отношение тормозных способностей

#### Отношения тормозных способностей для фотонных пучков

- Относительная средняя ограниченная тормозная способность воды и воздуха для фотонного пучка практически **не изменяется** с глубиной.
- Исключение: на поверхности и вблизи неё
- Отношения тормозных способностей воды и воздуха ( $\Delta = 10 \text{ keV}$ ) в условиях электронного равновесия приведены в таблице как функция  $\text{TPR}_{20,10}$

| Спектр фотонов   | $\text{TPR}_{20,10}$<br>(из TRS 398) | $\bar{L}_{w,a}^{-\Delta}$ |
|------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| $^{60}\text{Co}$ | 0.519                                | 1.134                     |
| 4 MV             | 0.581                                | 1.131                     |
| 6 MV             | 0.626                                | 1.127                     |
| 8 MV             | 0.667                                | 1.121                     |
| 10 MV            | 0.688                                | 1.117                     |
| 15 MV            | 0.731                                | 1.106                     |
| 20 MV            | 0.760                                | 1.096                     |
| 25 MV            | 0.768                                | 1.093                     |
| 35 MV            | 0.789                                | 1.084                     |



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

