## Лекция 3

## «Электромагнитное взаимодействие частиц с веществом»

1. Физические процессы для заряженных частиц
2. Физические процессы для гамма- квантов
3. Удельные ионизационные потери для тяжелых частиц
4. График удельных ионизационных потерь энергии
5. Эффект плотности
6. Переход от единиц $МэВ/см$ к единицам $МэВ/(г/см^2)$
7. Сопоставление ионизационных потерь для разных частиц
8. Удельные ионизационные потери энергии для электронов
9. Выводы

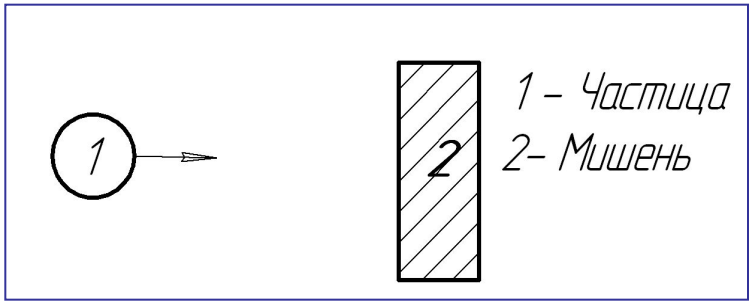
# Физические процессы для заряженных частиц

**Цель изучения – определить закономерности потерь энергии налетающих частиц в зависимости, как от характеристик самих частиц (энергия T, скорость V, масса m, электрический заряд Z), так и от параметров среды, через которую они проходят (плотности ρ, массовое число A, заряд ядра Z, прозрачность для видимого света).**

**Такая детализация позволяет решать двуединую задачу:**

**-эффективная регистрация падающего на вещество излучения;**

**-оценка его проникающей способности с целью защиты от радиации.**




**Задача решается с учетом толщины мишени (2), на которую падает частица (1): если мишень тонкая (dx), то вычисляются удельные потери энергии (dE/dx), если толстая – рассматривается процесс во всем объеме (по толщине).**

# Физические процессы для заряженных частиц

1. Упругое взаимодействие с атомными электронами (ионизационные потери заряженных частиц):

$$Z_1 + e \rightarrow Z_1 + e$$

2. Упругое рассеяние на ядрах (многократное рассеяние):

$$Z_1 + Z \rightarrow Z_1 + Z$$

3. Тормозное излучение, которое характерно только для электронов:

$$e_1 + z \rightarrow e_1 + z + \gamma$$

4. Черенковское излучение, которое возникает в прозрачной среде, если заряженная частица движется быстрее, чем скорость света ($v > c/n$, где $n$ – оптический показатель преломления) .

Частица на своем пути кратковременно поляризует молекулы среды, которые при деполяризации испускают видимый свет.

## Физические процессы для гамма- кванов

1. Упругое рассеяние на электронах среды (комптон-эффект):

$$\gamma + e \rightarrow \gamma' + e$$

2. Фотоэффект. Взаимодействие γ-кванта с нейтральным атомом. При этом γ-квант поглощается, выбивая из атома электрон:

$$\gamma + атом \rightarrow e^{-} + (атом)^{+}$$

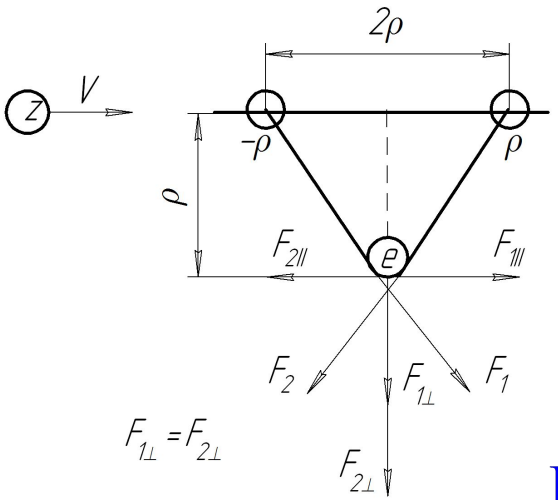
3. Рождение электрон-позитронной пары, в электромагнитном поле ядра:

$$\gamma + z \rightarrow e^{-} + z^{+} +$$

4. Образование каскадного ливня при попадании в вещество электрона или γ-кванта высокой энергии (больше критической). Последовательность процессов тормозного излучения и образования пар частиц в толстой мишени приводят к лавинообразному нарастанию числа вторичных частиц (е -, е+, γ) по глубине.

# Ионизационное торможение заряженных частиц

**Решение задачи вычисления dT/dx начнем с кулоновского взаимодействия тяжелой частицы (M1, Z1) со свободным электроном ( T1 >> I). Частица M1 пролетает мимо e на расстоянии ρ (прицельный параметр).**




**Разложим силы F1 и F2 на перпендикулярные и параллельные составляющие. Эффективно действуют только перпендикулярные составляющие сил. *Упрощение:* заменим переменную силу, которая действует на участке 2ρ, на силу в точке перпендикулярной**

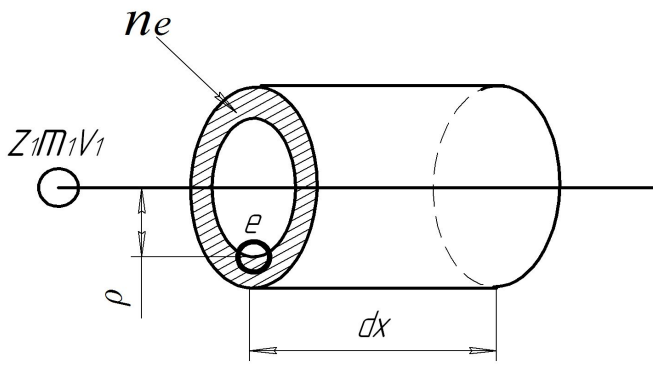
**Время действия силы на участке** $2\rho$ **равно** $\Delta t = \dfrac{2\rho}{V_1}$

Кулоновская сила $F_{k\perp} = \dfrac{z_1 e e}{\rho^2}$

Перпендикулярный импульс электрона: $p_{e\perp} = F_{k\perp} \cdot \Delta t = \dfrac{z_1 e^2}{\rho^2} \cdot \dfrac{2\rho}{V_1}$

Энергия, которую приобретает электрон: $\Delta T_{e\perp} = \dfrac{2 z_1^2 e^4}{\rho^2 V_1^2 m_e}$

# Ионизационное торможение заряженных частиц




ne-концентрация e в этом слое

**Полная энергия ΔTe, приобретенная всеми электронами с прицельным параметром ρ на толщине dx**

$$\Delta T_e = 2\pi\rho \cdot d\rho dx \cdot n_e \cdot \Delta T_{e1}$$

**Получаем** $$\Delta T_e = \frac{4\pi n_e z_1^2 e^4}{\rho V_1^2 m_e} d\rho dx$$

Удельная потеря энергии: $$\frac{\Delta T_e}{\Delta x}\left[\frac{МэВ}{см}\right] = \frac{4\pi n_e z_1^2 e^4}{\rho V_1^2 m_e} d\rho$$

$$\frac{dT}{dx} = C\int_{\rho\max}^{\rho\min}\frac{d\rho}{\rho} = C\ln\frac{\rho\max}{\rho\min}$$

где $C = \frac{4\pi n_e z_1^2 e^4}{V_1^2 m_e}$

# Учет диапазона прицельных параметров

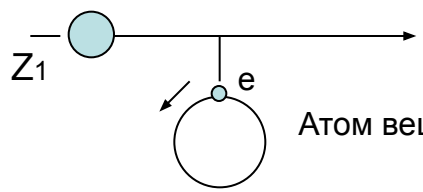
$$\frac{dT}{dx} = C\int_{\rho\,\max}^{\rho\,\min}\frac{d\rho}{\rho} = C\ln\frac{\rho\,\max}{\rho\,\min}$$

$$\Delta p\cdot\Delta x \approx \mathrm{h};\quad \Delta p^{\max}\Delta x^{\min} \approx \mathrm{h};\quad \Delta p^{\min}\cdot\Delta x^{\max} \approx \mathrm{h}$$

$$\Delta p^{\max} = 2m_eV_1;\ \rightarrow \rho^{\min} = \mathrm{h}/\Delta p^{\max} = \mathrm{h}/2m_eV_1 \rightarrow \mathrm{h}\sqrt{1-\beta_1^{\,2}}\,/\,2m_ec\beta_1$$

$$\Delta p^{\min}\Delta\rho^{\max} = \mathrm{h};\quad c\Delta p^{\min}\Delta\rho^{\max} = \mathrm{h}c;\ \rightarrow\ I\rho^{\max} = \mathrm{h}c;\qquad \rho^{\max} = \mathrm{h}c/I$$

$$t_{взаим} < t^{e}_{вращения}$$




Атом вещества мишени

$$\frac{\rho^{\max}}{V_1}\sqrt{1-\beta_1^2} < t^{e}_{вращ}\qquad t^{e}_{вращ} \approx \frac{1}{\nu_e} \approx \frac{\mathrm{h}}{\nu_e\mathrm{h}} \approx \frac{\mathrm{h}}{I_2}$$

Пусть $t^{e}_{вращ} \approx t^{e}_{взаим}$

$$\rho^{\max} = \frac{\mathrm{h}V_1}{I_2\sqrt{1-\beta_1^2}} = \frac{\mathrm{h}\beta_1 c}{I_2\sqrt{1-\beta_1^2}}$$

$$\frac{dT}{dx} = C\ln\frac{\rho\,\max}{\rho\,\min} = C\ln\frac{2m_ec^2\beta_1^{\,2}}{I_2(1-\beta_1^{\,2})}$$

## Ионизационное торможение заряженных частиц

**Получаем формулу Бете-Блоха**

$$\frac{dE}{dx}\left[\frac{МэВ}{см}\right]=\frac{z_1^2 n_e}{V_1^2 m_e}\cdot\ln\frac{2m_e V_1^2}{I_2(1-\beta_1^2)}$$

Концентрация электронов: $n_e=\frac{N_{ав}}{A}(\frac{ат}{г})\cdot\rho(\frac{г}{см^3})\cdot z(\frac{1}{ат})$

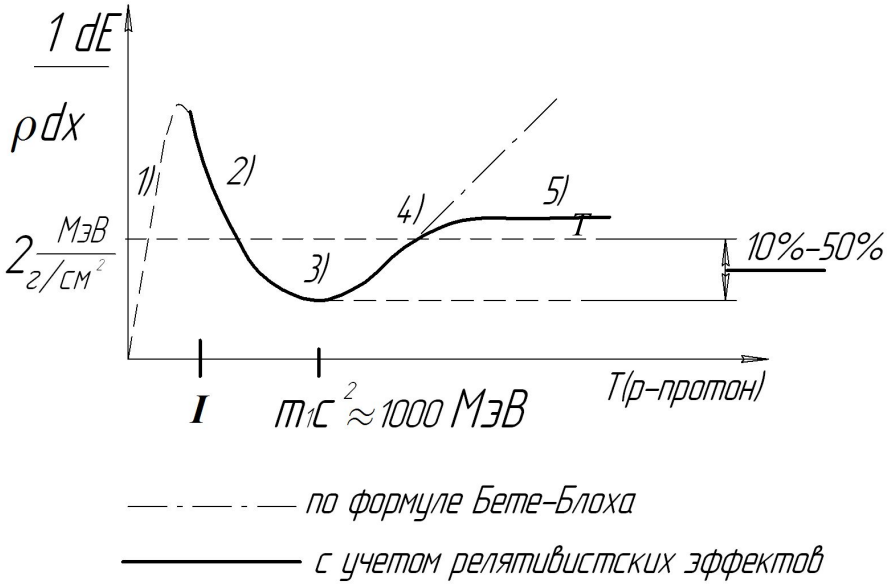
Для сравнения ионизационных потерь в разных веществах, используют единицы г/см$^2$

$$\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx}\left[\frac{1}{\frac{г}{см^3}}\frac{МэВ}{см}\right]=\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx}\left[\frac{МэВ}{г/см^2}\right]$$

Зависимоть ионизационных потерь от параметров частицы (1) и мишени (2):

$$\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx}\propto\frac{z_1^2}{V_1^2}(\frac{z_2}{A_2})\ln\frac{m_e{}^2\beta_1^2}{I_2(1-\beta_1^2)}.$$

# График удельных ионизационных потерь энергии



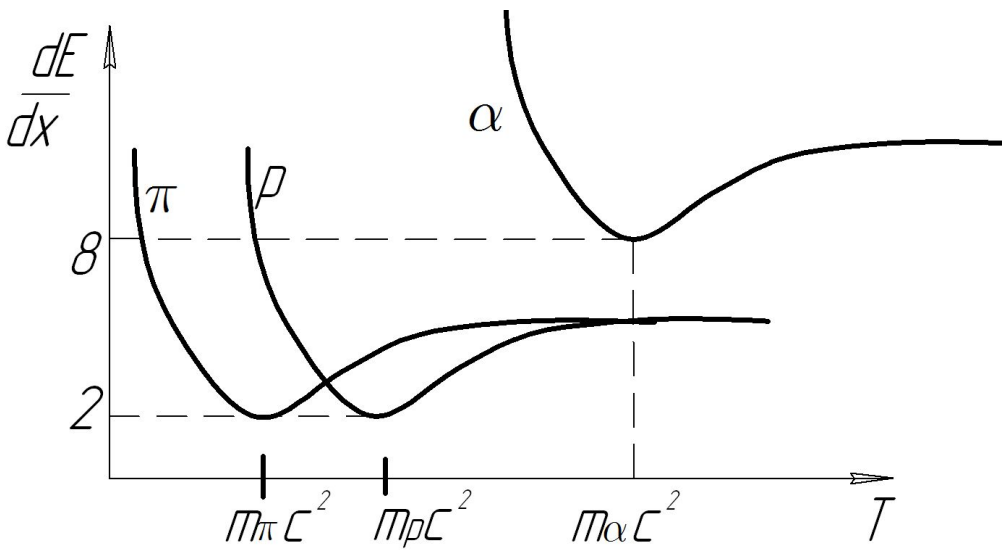

**dE/dx представляет собой потери энергии в тонком слое при фиксированной энергии T1.**

**Минимум функции достигается при** $V_1 / C > 0,96$

**или** $T_1 \approx (2-3)\, M_1 c^2$

1) $T_1 < I$ **- электрон связан. Энергия тратится на возбуждение атома.**
2) $I << T_1 << mc^2$ **. Здесь** $dE/dx : \ 1/V^2$ **. Это обусловлено уменьшением эффективного времени столкновения с электронами .**
3) $T_1 \approx mc^2$ **– скорость $V_1 \approx$ c, время столкновения мало меняется. Это приводит к минимуму dE/dx.**
4) $T_1 > mc^2$ **- начинают заметно действовать релятивистские эффекты. Вытягивание поперечного электрического поля налетающей частицы .**
5) $T_1 >> mc^2$ **– начинается процесс экранирования поля частицы.**

# Ионизационное торможение заряженных частиц




**На одном рисунке приведены качественные графики dE/dx для трех разных частиц: π±-мезона, p+- протона и α++- частицы. Кривые подобны, но смещены относительно друга, в зависимости от массы частиц и их зарядов.**

**С учетом эффекта плотности**

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi \cdot Z_1^2 \cdot n_e \cdot e^4}{m_e \cdot V_1^2}\left\{\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta_1^2}{I\left(1-\beta_1^2\right)}\right) - \delta\left(\beta_1\right) - U(\beta_1)\right\}$$

**где δ – учитывает эффект плотности и имеет вид (при β → 1):**
**$\delta(\beta) = -\ln(1-\beta^2) - 2\ln(I/h\nu_p) - 1$, где $\nu_з$ – плазменная частота электронов.**

**Функция δ(β) компенсирует логарифмический рост dE/dx при высокой энергии. Практически, полное выполаживание функции dE/dx происходит при $T_1 \approx 50\ m_1c^2$. Функция $U(ß_1)$ учитывает потери энергии на возбуждение атома.**

## Ионизационные потери энергии электронов

**Механизм потерь энергии налетающего электрона при столкновении с электронами среды в целом аналогичен процессу взаимодействия тяжелых частиц. Особенности обусловлены малой массой налетающего электрона и обменными эффектами между тождественными частицами**

$$\frac{dT}{dx} = \frac{4\pi e^4 \cdot n_e}{m_e \cdot V_1^2}\left\{\ln\frac{m_e c^2 \beta_1^2}{2I\left(1-\beta_1^2\right)} - 2\left(\sqrt{1-\beta_1^2} - 1 + \beta_1^2\right)\ln 2 + \left(1-\beta_1^2\right) + \frac{1}{8}\left(1-\sqrt{1-\beta_1^2}\right)\right\}$$

**Анализ этой формулы показывает, что в нерелятивистском пределе ($\beta_1 << 1$) при одинаковой скорости , удельные ионизационные потери протона и электрона отличаются незначительно.**

**Если их энергии будут одинаковы, то отношение удельных потерь в этой области будет сильно отличаться в отношении масс $m_p/m_e$.**

**В ультрарелятивистской области (T≈10 ГэВ) фактор зависимости от скорости ($V_1 \approx c$) пропадает, и ионизационные потери энергии выравниваются: $(dE/dx)_e/(dE/dx)_p \approx 2$.**

**Вывод**:

-заряженные частицы в слое вещества тратят свою энергию на возбуждение и ионизацию атомов;

-однократная передача энергии в среднем составляет малую величину (десятки эВ);

-удельные ионизационные потери (в тонком слое) зависят от заряда и скорости частицы $dE/dx \propto z_1^2/V_1^2$ ;

- на толщине 1 $г/см^2$ $(\Delta x(см^2) = x\Delta(см) \cdot \rho(см^3)$ величина потерь энергии слабо зависит от характеристик вещества поглотителя (заряда, массового числа, плотности, потенциала ионизации атома - $Z_2, A_2, \rho_2, I_2$ ).

Это относится к быстрым частицам, кинетическая энергия которых значительно превышает средний потенциал ионизации вещества.