

Семинар 2

Ионизационные потери энергии заряженных частиц. Пробег частиц в среде.

2.1. Протон с кинетической энергией 25 МэВ пролетел мимо покоящегося свободного электрона, имея прицельный параметр 20 пм. Используя закон сохранения момента импульса, найти кинетическую энергию электрона отдачи. Считать, что все время траектория протона является прямолинейной, а электрон остается неподвижным. Характерным радиусом взаимодействия считать два прицельных параметра.

2.2. Быстрый протон движется со скоростью v через среду с концентрацией электронов n_e . Воспользовавшись решением предыдущей задачи, определить энергию, теряемую протоном на единице пути в результате взаимодействия с электронами, относительно которых его прицельный параметр заключен в интервале $(b, b + db)$.

2.3. Используя формулу расчёта ионизационных потерь энергии, для протонов с энергией 10 МэВ, движущихся в кремнии, найти (оценить):

- а) среднюю потерю энергии в слое кремния толщиной 100 мкм, характерной для полупроводниковых детекторов излучений;
- б) толщину слоя кремния, в котором протоны потеряют половину своей энергии.

2.4. На выходе ускорителей заряженных частиц их энергия может превышать требуемую по условиям эксперимента. Найти толщину алюминиевой фольги, при прохождении через которую средняя энергия α -частиц уменьшается с 10 МэВ до 9 МэВ.

2.5. Найти отношение ионизационных потерь энергии:

- а) протона и α -частицы в воздухе;
- б) α -частицы в кремнии и свинце.

Считать кинетическую энергию всех частиц в обоих случаях равной 10 МэВ.

2.6. Найти с помощью формулы для ионизационных потерь энергии зависимость между пробегами в среде медленных протона и дейтрона с одинаковыми скоростями.

2.7. Используя решение предыдущей задачи, найти средний пробег дейтрона с кинетической энергией 2 МэВ в воздухе.

2.8. Найти кинетическую энергию α -частиц со средним пробегом в железе 9.5 мкм. Какой пробег они будут иметь в воздухе, алюминии и свинце.

2.9. Вычислить пробег электронов с кинетической энергией 5 МэВ в воздухе, алюминии и свинце. Сравнить результат с решением предыдущей задачи и сделать выводы, обратив внимание, что указанная энергия характерна для естественных источников α - и β -частиц.

2.10. Найти число пар ионов, которое образует

- а) протон с начальной энергией 1 МэВ на первой половине среднего пробега в воздухе;
- б) α -частица с начальной энергией 5 МэВ на первом сантиметре своего пути в воздухе.

Энергию образования одной пары ионов принять равной 34 эВ.

Радиационные потери энергии легких заряженных частиц. Радиационная длина.

2.11. Вычислить кинетическую энергию электронов, при которой потери энергии на ионизацию и тормозное излучение одинаковы в графите, кремнии, алюминии, железе и свинце. Какой механизм потерь энергии преобладает в каждой из сред для электронов с энергией 50 МэВ?

2.12. Рассчитать полные потери энергии электронов с кинетической энергией 50 МэВ в пластинах из алюминия и свинца толщиной 1 см. Сравнить результаты между собой, а также с

полными потерями протонов такой же энергии в этих же веществах. Сделать выводы, имея в виду, что эти и более высокие энергии характерны для частиц в космическом излучении.

2.13. Найти радиационную длину для электронов в некотором веществе, считая основным механизмом потерь энергии радиационный, если после прохождения пластины толщиной 0.5 см их энергия в среднем уменьшилась на 25%.

2.14. Для электронов найти и построить зависимость радиационной длины от порядкового номера вещества. Вычислить радиационную длину для электрона в кремнии и свинце; сравнить полученные значения.

2.15. Используя решение предыдущей задачи, найти среднюю энергию электронов после прохождения металлической пластинки толщиной 15 мм, если их начальная кинетическая энергия равна 100 МэВ.

Излучение Вавилова-Черенкова.

2.16. Вычислить пороговую кинетическую энергию эффекта Вавилова-Черенкова для электронов и протонов в воздухе ($n=1.0003$) и в воде ($n=1.33$).

2.17. Найти кинетическую энергию электронов, движущихся в стекле ($n=1.8$) и излучающих свет под углом 45° .

2.18. Для каких частиц пороговая кинетическая энергия эффекта Вавилова-Черенкова в среде с показателем преломления $n=1.6$ равна 29.6 МэВ.

Переходное излучение.

2.19. Вычислить отношение интенсивностей переходного излучения

а) электронов и π^\pm - мезонов, а также

б) электронов и протонов

с одинаковыми кинетическими энергиями.

Упругое рассеяние заряженных частиц.

2.20. Найти кинетическую энергию протона, испытавшего лобовое упругое соударение с покоящимся дейтроном, если до этого его энергия равнялась 10 МэВ.

2.21. α -частица с энергией 5 МэВ упруго рассеялась на покоящемся ядре ${}^6\text{Li}$. Определить энергию ядра отдачи, если оно отлетело под углом 30° к первоначальному направлению движения α - частицы.

2.22. Медленный дейтрон упруго рассеялся на покоящемся ядре-мишени под углом 30° , которое, в свою очередь, отлетело под таким же углом к направлению движения налетающего дейтрона. Определить, какому атому принадлежит ядро-мишень?

Дополнительные вопросы.

1. На основании проведённых вычислений сделать выводы:

- какая из заряженных частиц или ядер (электроны, протоны, дейтроны или альфа-частицы) обладает наибольшей проникающей способностью;
- какие вещества наилучшим образом подходят для защиты от заряженного излучения;
- к чему может привести прохождение медленного тяжёлого ядра (например, железа) через электронные компоненты, выполненные на основе полупроводников.

2. Что, по вашему мнению, вызывает свечение охлаждающей жидкости ядерного реактора или воды на больших глубинах в океане? Почему это свечение не наблюдается в воздухе?

Дополнительная информация

1. Ионизационные потери энергии медленной тяжелой заряженной частицы в веществе:

$$-\left(\frac{\partial E}{\partial x}\right)_{\text{ион}} = \frac{4\pi e^4}{m_e} \frac{n_e Z_{\text{ч}}^2}{v^2} \ln \frac{2m_e v^2}{\bar{I}}.$$

2. Ионизационные потери энергии быстрой тяжелой заряженной частицы в веществе:

$$-\left(\frac{\partial E}{\partial x}\right)_{\text{ион}} = \frac{4\pi e^4}{m_e} \frac{n_e Z_{\text{ч}}^2}{v^2} \left[\ln \frac{2m_e v^2}{\bar{I}} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 - \delta \right]$$

3. Ионизационные потери энергии электронов в веществе:

$$-\left(\frac{\partial E}{\partial x}\right)_{\text{ион}} = \frac{2\pi e^4}{m_e} \frac{n_e}{v^2} \left[\ln \left(\frac{m_e T_e}{\bar{I}^2} \frac{v^2}{2(1 - \beta^2)} \right) - \left(2\sqrt{1 - \beta^2} - 1 + \beta^2 \right) \ln 2 + 1 - \beta^2 \right]$$

В приведённых формулах:

$Z_{\text{ч}}$ – заряд частицы (в единицах заряда электрона);

m_e – масса электрона ($m_e c^2 = 511$ кэВ – энергия покоя электрона);

n_e – концентрация электронов в веществе ($n_e = N_A (Z_{\text{ср}}/A) \rho$, N_A – число Авогадро, $Z_{\text{ср}}$ – заряд ядер вещества среды, A – атомный вес ядер вещества среды, ρ – плотность среды);

v – скорость частицы; $\beta = v/c$, c – скорость света;

T_e – кинетическая энергия электрона;

$\bar{I} \approx 13.5 Z_{\text{ср}}$ (эВ) – средняя энергия ионизации атома вещества с порядковым номером $Z_{\text{ср}}$.

4. Эмпирические формулы для среднего пробега α -частицы с кинетической энергией T
а) в воздухе при нормальных условиях

$$R_{\alpha}(T) = 0.31 T^{3/2} \text{ см } (4 \text{ МэВ} < T < 7 \text{ МэВ});$$

б) в веществе с массовым числом A

$$R_{\alpha}(A, T) = 0.56 A^{1/3} R_{\alpha}(T) \text{ мг/см}^2$$

5. Эмпирическая формула для среднего пробега протона с кинетической энергией T в воздухе при нормальных условиях

$$R_p(T) = R_{\alpha}(4T) - 0.2 \text{ см } (T > 0.5 \text{ МэВ}).$$

6. Эмпирическая формула для среднего пробега электрона с кинетической энергией T в алюминии (если потери энергии электрона в основном ионизационные):

$$R_e(T) = \begin{cases} 0.407 T^{1.38} & (0.15 < T < 0.8 \text{ МэВ}) \\ 0.542 T - 0.133 & (0.8 \text{ МэВ} < T < 5 \text{ МэВ}) \end{cases} \text{ г/см}^2$$

Экстраполированный пробег электронов в веществе с зарядом Z и массовым числом A связан с пробегом в алюминии следующим образом:

$$R_e(A, Z, T) = \frac{R_e^{Al}(T)(Z/A)_{Al}}{(Z/A)} \text{ г/см}^2.$$

7. Радиационные потери энергии электрона (при $T \gg m_e c^2$), МэВ/см:

$$-\left(\frac{\partial E}{\partial x}\right)_{\text{рад}} = 2.32 \cdot 10^{-27} n_e T Z \left(4 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} + \frac{2}{9} \right),$$

где T – кинетическая энергия электрона в МэВ; n_e – концентрация электронов в веществе; $Z_{\text{ср}}$ – порядковый номер атомов вещества.