

Т. В. ГРИШКИНА, Г. И. КЛИМОВА,  
О. В. МИХАЙЛОВА

**СБОРНИК ЗАДАЧ**  
по курсу  
**„МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ  
ИЗЛУЧЕНИЙ“**



---

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Постановка физических экспериментов в современной ядерной физике в большинстве случаев связана с обнаружением различного рода частиц или квантов электромагнитного излучения. Регистрация ядерного излучения осуществляется с помощью разного рода детекторов, которые являются важнейшими элементами целого ряда измерительных приборов и сложных экспериментальных установок. Выбор того или иного детектора определяется свойствами регистрируемых частиц, характером их взаимодействия с материалом детектора, а также специфическими особенностями отдельного эксперимента. Разработка новых методов исследований в области ядерной физики и физики элементарных частиц потребовала более совершенных детекторов излучения. Принцип действия применяющихся в настоящее время детекторов, их свойства и особенности применения изучаются в курсе «Методы регистрации излучений». Однако полноценное освоение лекционного материала невозможно без решения конкретных задач. К сожалению, в вышедшей из печати литературе нет задачника по этому курсу.

Предлагаемый сборник задач включает в себя основные разделы, которые входят в программу курса «Методы регистрации излучений». Сборник рассчитан на студентов, изучивших атомную и ядерную физику и овладевших аппаратом дифференциального и интегрального исчисления в объеме курса высшей математики для вузов. Однако нам представляется полезным включить в сборник задач небольшое теоретическое введение, в котором изложены некоторые вопросы, связанные с взаимодействием элементарных частиц с веществом, а также основные положения теории ошибок измерений. Последовательность расположения материала в сборнике в основном соответствует программе, принятой в курсе «Методы регистрации излучений». В каждом разделе имеется небольшой теоретический материал, который может оказаться полезным при решении тех или иных задач. В конце сборника даны не только ответы, но и ход решения наиболее трудных задач. В условиях некоторых задач при-

ведены не все данные, необходимые для их решения. Это сделано для того, чтобы научить студентов пользоваться справочной литературой. К сожалению, сведения справочного характера разбросаны по многочисленным справочникам, а иногда необходимые данные можно найти только в специальных монографиях или в оригинальных статьях. Поэтому в приложении к сборнику даются таблицы и графики, в которых приведены наиболее современные значения физических величин, необходимых для решения задач.

---

## ВВЕДЕНИЕ

### Взаимодействие элементарных частиц с веществом

Процесс обнаружения элементарной частицы или кванта электромагнитного излучения всегда связан с тем или иным видом взаимодействия, которое имеет место при прохождении частицы через вещество регистрирующего прибора, а способ детектирования в значительной степени определяется механизмом взаимодействия. При прохождении через детектор частица или квант теряет свою энергию частично или полностью, несколькими порциями или сразу в зависимости от вида взаимодействия и от свойств самой частицы. В одних детекторах эта энергия преобразуется в энергию электрического тока, в других — ионизационный эффект, образованный заряженными частицами в веществе, можно наблюдать непосредственно или под микроскопом.

Для частиц, обладающих электрическим зарядом, основными видами потерь энергии при прохождении через материальную среду являются: 1) потери на ионизацию и возбуждение атомов — ионизационные потери; 2) потери на тормозное излучение — радиационные потери; 3) потери на излучение Черенкова. Для частиц тяжелее электрона удельная потеря энергии на ионизацию может быть вычислена по формуле Бете — Блоха

$$-\left(\frac{dT}{dx}\right)_{\text{ион}} = \frac{2\pi z^2 e^4}{m_e c^2 \beta^2} nZ \left[ \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 W_{\text{макс}}}{(1 - \beta^2) I^2} - 2\beta^2 - \delta - U \right],$$

где  $z$  — заряд частицы;  $n$  — число атомов в  $1 \text{ см}^3$  вещества;  $Z$  — атомный номер атомов среды;  $I$  — средний потенциал ионизации атомов;  $W_{\text{макс}}$  — максимальная энергия, передаваемая частицей атомному электрону;  $\delta$  — поправка, учитывающая уменьшение ионизационных потерь, возникающих в результате поляризации среды пролетающей через нее релятивистской частицей;  $U$  — член, учитывающий уменьшение ионизационных потерь при малых  $\beta = \frac{v}{c}$  из-за влияния свя-

зи атомных электронов на  $K$ - и  $L$ -оболочках атомов ( $v$  — скорость частицы). Ионизационные потери зависят от массы  $M$  тормозящейся частицы через величину

$$W_{\text{макс}} = \frac{\mathcal{E}^2 - (Mc^2)^2}{Mc^2 \left[ \frac{M}{2m_e} + \frac{m_e}{2M} + \frac{\mathcal{E}}{Mc^2} \right]},$$

где  $\mathcal{E}$  — полная энергия частицы;  $m_e$  — масса электрона.

Средняя энергия, затрачиваемая ионизирующей частицей на образование одной пары ионов  $\omega$ , определяется отношением величины энергии, потерянной частицей в среде, к полному количеству созданных ею пар ионов. Соответственно число пар ионов  $N_0$ , образованное частицей при полной потере энергии  $\mathcal{E}_0$ , равно:

$$N_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{\omega}.$$

Удельной ионизацией  $\nu$  называется число пар ионов, создаваемых частицей при прохождении 1 см пути в веществе. Величина  $\nu$  определяется отношением удельной потери энергии  $\frac{dT}{dx}$  к среднему значению энергии  $\omega$ , затрачиваемой на образование одной пары ионов:

$$\nu = \frac{dT/dx}{\omega}.$$

Потери энергии на тормозное излучение обратно пропорциональны квадрату массы частицы, т. е.  $1/M^2$ . Следовательно, радиационные потери могут играть роль лишь при измерении энергии легких частиц, главным образом электронов. Для тяжелых частиц потери энергии на тормозное излучение ничтожно малы даже в веществах с большим атомным номером  $Z$ .

Величина потерь на черенковское излучение дается формулой Франка — Тамма

$$-\left(\frac{dT}{dx}\right)_{\text{чер}} = \frac{4\pi^2 e^2}{c^2} \int_{\beta n > 1} \left[ 1 - \frac{1}{(\beta n)^2} \right] \nu d\nu,$$

где  $\nu$  — частота излучения;  $n$  — показатель преломления среды; интегрирование производится по области значений  $\nu$ , для которых  $\beta n > 1$ .

Так как ионизирующие частицы, проходя через материальную среду, непрерывно теряют свою энергию вследствие неупругих столкновений с атомами, их пробег до практически полной потери энергии будет ограничен. Для тяжелых

частиц с кинетической энергией  $T_1$  Мэв средний пробег может быть найден путем вычисления интеграла

$$R(T_1) = \int_0^{T_1} \frac{dT}{\left| \frac{1}{\zeta} \cdot \frac{dT}{dx} \right|},$$

где  $\frac{1}{\zeta} \cdot \frac{dT}{dx}$  — средние потери энергии, Мэв  $\cdot$  см $^2 \cdot$  г $^{-1}$ . Найденный таким образом средний пробег  $R(T_1)$  будет выражен в г  $\cdot$  см $^{-2}$ .

Для  $\alpha$ -частиц естественной радиоактивности, энергии которых не сильно различаются, длины пробегов в каком-нибудь поглотителе можно оценить путем умножения длины пробега в воздухе на коэффициент тормозной способности вещества, найденный в соответствующей таблице, или рассчитать по приближенной формуле

$$R_\alpha = 0,56 \cdot R_{\text{возд}} \cdot A^{1/3},$$

где  $R_\alpha$  — пробег  $\alpha$ -частицы в веществе, г  $\cdot$  см $^{-2}$ ;  $R_{\text{возд}}$  — пробег  $\alpha$ -частицы в воздухе, см;  $A$  — атомный вес вещества.

Пробег частиц с массой  $M_i$  и кинетической энергией  $T_i$  в каком-либо веществе можно определить, зная для этого вещества пробег протона с массой  $M_p$  и кинетической энергией  $T_p = \frac{M_p T_i}{M_i}$ . Найденный таким образом пробег  $R_p(T_p)$  связан с искомым пробегом  $R_i(T_i)$  частицы соотношением

$$R_i(T_i) = \frac{1}{z_i^2} \cdot \frac{M_i}{M_p} R_p(T_p) F_i,$$

где  $z_i$  — заряд частицы;  $F_i$  — множитель, близкий к единице.

Определение средней длины пробега для электронов сопряжено со значительными трудностями вследствие того, что, проходя через среду, они испытывают сильное рассеяние. Обычно пользуются экстраполированным пробегом электронов данной энергии, который находится экспериментально из кривых поглощения электронов. Долю электронов, поглощенных веществом, можно оценить по приближенной формуле:

$$\delta_e = 1 - e^{-\mu_e x},$$

где  $x$  — толщина поглотителя;  $\mu_e$  — массовый коэффициент поглощения, который для электронов с энергиями от 0,5 до 6 Мэв можно получить из эмпирической формулы

$$\mu_e = \frac{22}{\mathcal{E}_e^{1,33}} \text{ см}^2 \cdot \text{г}^{-1},$$

где  $\mathcal{E}_e$  — энергия электрона.

Кванты электромагнитного излучения, проходя через материальную среду, могут поглощаться атомами среды (фото-

эффект), испытывать рассеяние на атомных электронах (комptonовское рассеяние) и конвертировать в электрическом поле ядер в электронно-позитронные пары. При фотоэлектрическом поглощении вся энергия  $\gamma$ -кванта затрачивается на вырывание одного из внутренних электронов атома, который при этом получает кинетическую энергию

$$T_{\Phi} = h\nu - I(K, L, \dots),$$

где  $I(K, L, \dots)$  — энергия связи электрона на соответствующей оболочке. При комpton-эффекте происходит рассеяние  $\gamma$ -квантов на электронах. При этом электрон получает энергию

$$T_{\kappa} = h\nu_0 - h\nu',$$

где  $h\nu_0$  — энергия падающего, а  $h\nu'$  — энергия рассеянного  $\gamma$ -квантов, определяемая углом рассеяния  $\theta$ ,

$$h\nu' = \frac{h\nu_0}{1 + \frac{h\nu_0}{mc^2}(1 - \cos \theta)}.$$

Угол рассеяния электронов  $\varphi$  можно определить из формулы

$$\operatorname{ctg} \varphi = \left(1 + \frac{h\nu_0}{mc^2}\right) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}.$$

Если энергия  $\gamma$ -квантов  $h\nu_0 > 2 m_e c^2 = 1,02 \text{ Мэв}$ , то основным процессом их взаимодействия с веществом становится процесс образования электронно-позитронной пары. При этом кинетическая энергия электрона  $T_e$  и позитрона  $T_{e^+}$  оказывается равной  $T_{e^+} + T_e = h\nu_0 - 1,02 \text{ Мэв}$ .

Для квантов электромагнитного излучения каждый акт взаимодействия с атомом вещества приводит либо к полному исчезновению кванта, либо к существенному изменению направления его движения. Интенсивность параллельного пучка  $\gamma$ -квантов, прошедших в поглотителе толщину  $x$ , убывает по экспоненциальному закону:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x},$$

где  $I_0$  — начальная интенсивность;  $\mu$  — полный коэффициент поглощения, который представляется суммой трех коэффициентов:  $\mu_{\Phi}$ ,  $\mu_{\kappa}$ , и  $\mu_n$ , связанных с фотоэффектом, комpton-эффектом и процессом образования пар, т. е.

$$\mu = \mu_{\Phi} + \mu_{\kappa} + \mu_n.$$

Взаимодействие нейтронов с веществом сопровождается возникновением быстрых заряженных частиц и зависит от величины кинетической энергии нейтрона. Наиболее простым видом взаимодействия является упругое рассеяние нейтронов на ядрах атомов. При этом энергия ядра отдачи за-

висит от его массы  $M$ , угла рассеяния  $\varphi$  и энергии нейтрона  $T_n$  следующим образом:

$$T_{\text{я.о}} = \frac{4mM}{(m+M)^2} T_n \cos^2 \varphi,$$

где  $m$  — масса нейтрона. При рассеянии на ядрах водорода эта формула упрощается:

$$T_p = T_n \cos^2 \varphi.$$

Помимо упругого рассеяния нейтроны, взаимодействуя с ядрами вещества, могут вызывать разнообразные ядерные реакции, которые сопровождаются вылетом из ядра заряженных частиц: протона —  $(n, p)$ -реакция; дейтона —  $(n, d)$ -реакция;  $\alpha$ -частицы —  $(n, \alpha)$ -реакция и т. п. Захват нейтрона ядром может привести к образованию стабильного изотопа; в этом случае возбужденное ядро возвращается в основное состояние путем каскадного испускания  $\gamma$ -квантов —  $(n, \gamma)$ -реакция. Захват нейтрона некоторыми изотопами тяжелых ядер часто сопровождается делением этих ядер на осколки, обладающие очень большой кинетической энергией —  $(n, f)$ -реакция. Число актов деления можно определить из равенства:

$$N_f = FN_{\text{я}}\sigma_f,$$

где  $F$  — поток нейтронов, т. е. число нейтронов, проходящее через  $1 \text{ см}^2$  вещества в  $1 \text{ сек}$ ;  $N_{\text{я}}$  — число ядер вещества;  $\sigma_f$  — сечение деления.

Число нейтронов, претерпевших взаимодействие с атомами вещества, можно определить следующим образом:

$$n = n_0(1 - e^{-\sigma N}),$$

где  $n_0$  — число нейтронов, падающих на вещество;  $\sigma$  — сечение взаимодействия нейтрона с веществом;  $N$  — число ядер вещества, проектирующееся на  $1 \text{ см}^2$  сечения, перпендикулярного направлению потока нейтронов.

### Теория ошибок измерений

В основе явлений, изучаемых в ядерной физике, в подавляющем большинстве лежат закономерности статистического характера. Измеряемая величина представляет собой обычно число каких-либо неразличимых событий, происходящих независимо друг от друга, в случайные моменты времени. Таким образом, результат отдельного измерения физической величины, как правило, носит случайный характер. Однако можно установить вполне определенные статистические законы распределения вероятности появления того или иного значения случайной величины в отдельном измерении. Зна-



ние статистических законов позволяет также определить среднее значение измеряемой величины и оценить степень его достоверности. Среднее значение случайной величины  $\bar{N} = \sum N W(N)$ , где  $N$  — случайное значение статистической величины,  $W(N)$  — вероятность получить значение  $N$  в отдельном измерении. Отклонение величины, полученной в отдельном измерении, от ее среднего значения называется флуктуацией случайной величины. Мерой флуктуации служит дисперсия  $D$ , которую можно определить следующим образом:

$$D = \overline{(N - \bar{N})^2} = \overline{N^2} - \bar{N}^2.$$

В том случае, когда выражение для дисперсии известно, можно определить абсолютную погрешность измерения (иногда ее называют среднеквадратичным или стандартным отклонением)  $\sigma = \sqrt{D}$  и найти ее относительную ошибку  $\delta = \frac{\sigma}{\bar{N}}$ . Наиболее часто, особенно в ядерной физике, приходится иметь дело со следующими законами распределения вероятностей случайных величин.

Биномиальное распределение, которое определяет вероятность  $W(m)$  того, что из некоторого ограниченного числа  $N$  независимых и неразличимых событий произойдет заданное количество событий  $m$ . Если обозначить через  $p$  вероятность того, что произойдет одно событие, и соответственно через  $1 - p$  вероятность того, что событие не произойдет, то биномиальное распределение можно выразить следующим образом:

$$W(m) = C_N^m p^m (1 - p)^{N-m},$$

где

$$C_N^m = \frac{N(N-1)(N-2)\dots(N-m+1)}{m!} = \frac{N!}{(N-m)! m!}$$

— число сочетаний из  $N$  по  $m$ . Среднее число событий, распределенных по биномиальному закону, оказывается равным:  $\bar{N} = Np$ . Дисперсия величины  $m$  может быть выражена в виде

$$D(m) = Np(1 - p) = \bar{N} \left(1 - \frac{\bar{N}}{N}\right).$$

Соответственно абсолютную ошибку измерения можно определить из равенства

$$\sigma = \sqrt{\bar{N} \left(1 - \frac{\bar{N}}{N}\right)},$$

а относительную ошибку — из равенства

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\bar{N}} - \frac{1}{N}}.$$

Распределение Пуассона позволяет определить вероятность  $W(m)$  появления заданного числа событий  $m$  в том случае, когда число случайных событий сколь угодно велико, а среднее значение измеряемой величины  $n_0$  известно:

$$N(m) = \frac{n_0^m}{m!} e^{-n_0}.$$

В этом случае дисперсия величины  $m$  равна ее среднему значению  $D(m) = n_0$ , абсолютная ошибка измерения  $\sigma = \sqrt{n_0}$ , а относительная ошибка  $\delta = \frac{1}{\sqrt{n_0}}$ .

Распределение Гаусса позволяет найти вероятность того, что случайная величина  $m$  отличается от своего среднего значения  $n_0$  на величину  $x$ , т. е.  $m - n_0 = x$ . Эта вероятность  $W(x)$  может быть выражена следующим образом:

$$W(x) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2}.$$

Величину  $h = \frac{1}{\sqrt{2n_0}}$  обычно называют мерой точности. Величина дисперсии в этом случае  $D(m) = n_0$ , абсолютная ошибка  $\sigma = \sqrt{n_0}$ , относительная ошибка  $\delta = \frac{1}{\sqrt{n_0}}$ .

Иногда физическая величина получается в результате многократных повторных измерений случайной величины  $m$ :  $m_1, m_2, \dots, m_k$ . В этом случае среднее значение величины  $m$  можно найти из равенства

$$n_0 = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_k}{k}.$$

Абсолютная ошибка измерения в этом случае

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^k m_i^2}}{k} = \sqrt{\frac{n_0}{k}}.$$

При измерении случайных величин помимо неизбежной статистической неопределенности экспериментальных данных возникает и некоторая методическая погрешность, обусловленная, с одной стороны, конечной разрешающей способностью аппаратуры, а с другой — случайным распределением

ем событий во времени. Эта погрешность возникает вследствие того, что временной интервал между последующими событиями случайно может оказаться меньше времени разрешения регистрирующего прибора  $\tau$ . Связь между числом частиц  $N$ , проходящих через регистрирующий прибор в единицу времени, временем разрешения регистрирующего прибора  $\tau$  и скоростью счета  $n$  можно выразить следующим образом:  $N = \frac{n}{1 - n\tau}$ .

Часто искомая величина представляет собой функцию от нескольких случайных величин  $N = F(N_\alpha, N_\beta, \dots)$ . В этом случае дисперсия величины  $N$  определяется следующим образом:

$$D(N) = \sum_i \left( \frac{\partial F}{\partial N_i} \right)^2 D_i.$$

Тогда абсолютная ошибка измерения оказывается равной:

$$\sigma = \sqrt{\sum \left( \frac{\partial F}{\partial N_i} \right)^2 \sigma_i^2},$$

а относительная ошибка выразится как

$$\delta = \frac{\sigma}{N} = \frac{\sqrt{\sum \left( \frac{\partial F}{\partial N_i} \right)^2 \sigma_i^2}}{N}.$$

В частности, если искомая величина  $N$  представляет собой сумму или разность двух (или нескольких) случайных величин  $N_\alpha$  и  $N_\beta$ , дисперсия оказывается равной:

$$D(N) = D(N_\alpha) + D(N_\beta).$$

Соответственно абсолютная ошибка измерения равна:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\beta^2},$$

а относительная ошибка определится как

$$\delta = \frac{\sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\beta^2}}{N_\alpha \pm N_\beta}.$$

-----

## Токовая ионизационная камера

Заряженные частицы, проходя через газ, испытывают большое количество неупругих соударений со связанными электронами молекул, в результате чего в газе возникают свободные электроны и тяжелые положительные ионы. В токовой камере этот ионизационный эффект используется для измерения суммарной ионизации, создаваемой ионизирующим излучением в рабочем объеме камеры в единицу времени. В этом случае величину тока насыщения можно определить следующим образом: если условия облучения таковы, что в рабочем объеме камеры каждую секунду возникает  $N_0$  пар ионов, то сила тока  $I_0$  равна:

$$I_0 = eN_0,$$

где  $e$  — элементарный заряд.

Для плоской ионизационной камеры, облучаемой равномерно по всему объему источником постоянной интенсивности, можно с достаточной точностью оценить величину тока и в той области напряжений, где рекомбинация играет заметную роль. В этом случае ток равен:

$$I = \frac{V^2}{2b} \left( \sqrt{1 + \frac{4b}{V^2}} - 1 \right) I_0.$$

Здесь  $I_0$  — ток насыщения;  $V$  — разность потенциалов между электродами;  $b = \frac{\zeta n_0 d^4}{6K_+ K_-}$ , где  $n_0$  — концентрация носителей зарядов,  $d$  — расстояние между электродами,  $\zeta$  — коэффициент рекомбинации,  $K_+$  и  $K_-$  — подвижность положительных и отрицательных ионов соответственно. Эта формула теряет свою силу только при малых значениях тока, когда  $I < 0,2 I_0$ .

1. Определить минимальное расстояние между электродами ионизационной камеры, регистрирующей  $\alpha$ -частицы  $\text{Po}^{218}$ . Камера наполнена аргоном до давления  $p = 2 \text{ атм}$ .

2. Определить остаточный пробег  $\alpha$ -частиц  $\text{Po}^{210}$  в ионизационной камере, наполненной аргоном до давления  $p=1$  атм, если частицы проникают в нее через окошко из слюды толщиной 16,5 мк.

3. Ионизационная камера, наполненная аргоном до давления  $p=380$  мм рт. ст., имеет входное окно диаметром 100 мк. Источник  $\alpha$ -частиц эманации радия расположен вне камеры на расстоянии 0,5 см от окна. Какой толщины следует выбрать алюминиевую фольгу, закрывающую входное окно, при условии, что остаточный пробег  $\alpha$ -частиц в камере должен быть не менее 4 см?

4. В центре одного из электродов плоской ионизационной камеры нанесен тонкий слой  $\text{U}^{238}$ . Электроды имеют форму диска диаметром  $D=6$  см, расстояние  $d$  между ними равно 20 мм. Каково должно быть давление аргона в камере, чтобы  $\alpha$ -частицы теряли всю свою энергию в рабочем объеме?

5. Определить ионизационные потери  $\mu$ -мезона с энергией 4 Мэв в воздухе, если известно, что в воздухе ионизационные потери для протона с той же энергией составляют 80,53 Мэв/(г·см<sup>-2</sup>). Рассчитать, какой энергией должен обладать  $\mu$ -мезон для того, чтобы его ионизационные потери сравнялись с ионизационными потерями протонов с энергией 4 Мэв.

6. Сравнить удельную ионизацию, производимую в воздухе  $\alpha$ -частицами и электронами с энергией 4 Мэв.

7. Оценить ток насыщения в ионизационной камере, в центре одного из электродов которой нанесен тонкий слой радиоактивного вещества  $\text{Th}^{232}$  активностью в 250 мккюри. Камера наполнена аргоном; расстояние между электродами  $d=2$  см; потерями энергии в радиоактивном слое пренебречь. Рассчитать, какое давление нужно создать в камере, чтобы  $\alpha$ -частицы теряли всю свою энергию в рабочем объеме.

8. Ионизационная камера объемом 0,7 см<sup>3</sup> наполнена воздухом до давления  $p=1$  атм. Камера помещалась в поток  $\gamma$ -квантов, и измерялся ток насыщения, который оказался равным  $I_0=4,65 \cdot 10^{-14}$  а. Определить мощность дозы в миллирентгенах в секунду.

9. Построить зависимость тока насыщения от давления в ионизационной камере, наполненной аргоном: а) для электронов с энергией 4 Мэв; б) для  $\alpha$ -частиц с энергией 4 Мэв. Источник заряженных частиц расположен в центре сферической камеры с радиусом  $r=2$  см.

10. Найти величину тока насыщения в ионизационной камере, предназначенной для измерения суммарной ионизации, вызываемой космическими лучами, на уровне моря. Камера имеет форму сферы радиусом  $r=10$  см и наполнена воздухом до давления  $p=10$  атм. Предполагается, что: а) космические частицы состоят в основном из однозарядных реляти-

вистских частиц; б) поток частиц направлен по вертикали; в) плотность потока на уровне моря равна  $1,2 \text{ част}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$ .

11. Ток насыщения, вызываемый космическими лучами в ионизационной камере,  $I_0 = 3,84 \cdot 10^{-15} \text{ а}$ . Камера имеет форму сферы радиусом  $r = 5 \text{ см}$  и наполнена аргоном до давления  $p = 6 \text{ атм}$ . Вычислить величину допустимого загрязнения материала камеры  $\alpha$ -частицами естественной радиоактивности (т. е. допустимое число  $\alpha$ -частиц с  $1 \text{ см}^2$  поверхности металла в час) при условии, что фон от  $\alpha$ -частиц в камере должен составлять не более 10% ионизационного тока, вызываемого космическими лучами. Средняя энергия  $\alpha$ -частиц естественной радиоактивности около 6 Мэв.

12. Вычислить величину тока насыщения в цилиндрической ионизационной камере диаметром  $D = 2 \text{ см}$ , длиной  $l = 10 \text{ см}$ , наполненной воздухом до давления  $p = 1 \text{ атм}$ . Камера облучается электронами с энергией 0,5 Мэв, которые проникают в рабочий объем камеры через алюминиевую фольгу толщиной 10 мк. Поток электронов направлен параллельно оси камеры. Плотность потока составляет  $15 \text{ электрон}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$ .

13. Оценить величину тока насыщения в ионизационной камере, наполненной чистым водородом до давления  $p = 1 \text{ атм}$ , при регистрации нейтронов с энергией  $\mathcal{E}_n = 1 \text{ Мэв}$ . Плот-

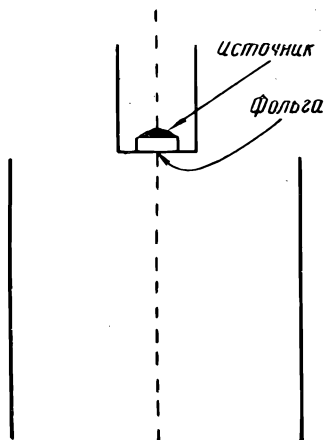


Рис. 1.

ность потока равна  $1500 \text{ нейтрон}/(\text{см}^2 \cdot \text{сек})$ . Камера имеет форму сферы радиусом  $r = 10 \text{ см}$ .

14. Оценить толщину алюминиевой фольги, которая закрывает входное окошко ионизационной камеры, если ток насыщения от  $\alpha$ -частиц должен быть не менее  $7,5 \cdot 10^{-8} \text{ а}$ . Активность источника  $\alpha$ -частиц 250 мккюри. Камера напол-

нена аргонном до давления  $p=2$  атм. Диаметр окошка  $D=0,5$  см. Источник  $\alpha$ -частиц с энергией 6,3 Мэв расположен на расстоянии 1 мм от окошка (рис. 1).

15. Какой ток регистрирует сферическая ионизационная камера радиусом  $r=10$  см, регистрирующая поток тепловых нейтронов от реактора? Камера наполнена газом  $\text{BF}_3$  до давления  $p=5$  атм. Плотность потока составляет  $10^8$  нейтрон/(см<sup>2</sup>·сек).

### Импульсная ионизационная камера

В импульсной ионизационной камере эффект от отдельной заряженной частицы используется для образования импульса напряжения. Максимальная амплитуда этого импульса в основном определяется количеством энергии  $T$ , потерянной частицей в рабочем объеме камеры:  $\Delta V_{\text{макс}} = \frac{eT}{\omega C}$ . Здесь  $\omega$  — средняя энергия, которая затрачивается заряженной частицей на образование одной пары ионов;  $C$  — емкость собирающего электрода камеры по отношению к земле. Продолжительность импульса зависит от размеров камеры, природы и давления газа в ней, величины напряжения питания и параметров внешней цепи (произведения  $RC$ , где  $R$  — сопротивления утечки). В том случае, когда величина  $RC$  больше времени собирания положительных ионов, максимальную величину импульса можно представить в виде двух слагаемых: электронной составляющей  $\Delta V(T_e)$  и ионной составляющей  $\Delta V(T_+)$ :

$$\Delta V_{\text{макс}} = \Delta V(T_e) + \Delta V(T_+).$$

Зависимость величины импульса от времени для любой из этих составляющих выражается следующим образом:

$$\Delta V(t) = e^{-\frac{t}{RC}} \frac{1}{C} \int_0^t e^{\frac{t}{RC}} I(t) dt,$$

где  $I(t)$  — ток, возникающий в ионизационной камере при перемещении под действием электрического поля носителей зарядов данного знака. Для плоской ионизационной камеры эту зависимость можно переписать в виде

$$\Delta V(t) = e^{-\frac{t}{RC}} \frac{u}{Cd} \int_0^t e^{\frac{t}{RC}} q(t) dt,$$

где  $u$  — скорость дрейфа носителей зарядов данного знака;  $d$  — расстояние между электродами;  $q(t)$  — заряд, перемещающийся в момент времени  $t$  в рабочем объеме камеры. В случае локализованного заряда  $q(t) = \text{const} = q_0 = eN_0$ , где

$N_0$  — число пар ионов, образованное заряженной частицей. Эту формулу можно применять при расчете формы импульса в том случае, когда регистрируемая частица пролетает перпендикулярно силовым линиям электрического поля. Если же направление полета частицы совпадает с направлением силовых линий поля, то количество носителей зарядов в камере с течением времени будет убывать, и к моменту времени  $t$  в камере останется заряд

$$q(t) = q_0 \left( 1 - \frac{ut}{R_0} \right),$$

где  $R_0$  — пробег заряженной частицы.

При регистрации осколков деления количество  $\alpha$ -активного вещества, которое можно поместить в ионизационную камеру, ограничивается разрешающей способностью камеры. Если число  $\alpha$ -частиц, испускаемых в единицу времени, достаточно велико, то за время разрешения  $\tau$  будет происходить наложение импульсов от  $\alpha$ -частиц. Тогда результирующий импульс может оказаться сравнимым с импульсами, обусловленными осколками деления. Число импульсов от  $n$ -кратно наложенных  $\alpha$ -частиц  $N(n)$ , сочитанное ионизационной камерой в единицу времени, можно определить из следующей формулы:

$$N(n) = \frac{N_\alpha}{1 + \tau N_\alpha} e^{-\tau N_\alpha} \frac{(\tau N_\alpha)^{n-1}}{(n-1)!},$$

где  $N_\alpha$  — число  $\alpha$ -частиц, испускаемых источником в единицу времени;  $n$  — кратность наложения;  $\tau$  — время разрешения ионизационной камеры.

16. Определить скорость дрейфа электронов в плоской ионизационной камере, наполненной аргоном до давления  $p=400$  мм рт. ст., если расстояние  $d$  между электродами камеры равно 2 см, а напряжение  $V$ , приложенное к ним, составляет 1000 в.

17. Вычислить скорость дрейфа для положительных ионов в плоской ионизационной камере, наполненной аргоном до давления  $p=2$  атм, если расстояние  $d$  между электродами камеры равно 3 см, а напряжение  $V$ , приложенное к ним, составляет 800 в.

18. В середине плоской ионизационной камеры, наполненной сухим воздухом при атмосферном давлении, перпендикулярно силовым линиям поля пролетает  $\alpha$ -частица. Определить время собирания положительных и отрицательных ионов, если расстояние  $d$  между электродами камеры равно 4 см, а напряжение  $V$ , приложенное к ним, составляет 600 в.

19. В плоской ионизационной камере, наполненной аргоном до давления  $p=450$  мм рт. ст., на расстоянии 2 см от



отрицательного электрода перпендикулярно силовым линиям поля пролетает  $\alpha$ -частица. Сравнить время собирания электронов и положительных ионов, если расстояние  $d$  между электродами камеры равно 5 см, а напряжение  $V$ , приложенное к ним, составляет 800 в.

20. Расстояние  $d$  между электродами плоской ионизационной камеры равно 3 см. Напряжение  $V$ , приложенное к ним, составляет 1000 в. Камера наполнена аргонном до давления  $p=500$  мм рт. ст. Эквивалентная емкость собирающего электрода по отношению к земле  $C=40$  пф. Оценить величину сопротивления утечки в камере, работающей на полном импульсе. Источник  $\alpha$ -частиц расположен на отрицательном электроде.

21. Импульсная ионизационная камера с плоскими электродами работает на электронной составляющей. Расстояние  $d$  между электродами камеры равно 2 см. Напряжение  $V$ , приложенное к ним, составляет 600 в. Камера наполнена аргонном до давления  $p=420$  мм рт. ст. Оценить величину сопротивления утечки, если эквивалентная емкость собирающего электрода по отношению к земле  $C=50$  пф. Источник  $\alpha$ -частиц расположен на отрицательном электроде.

22. Импульсная ионизационная камера наполнена аргонном до давления  $p=5$  атм. Камера подключена к импульсному усилителю с коэффициентом усиления  $K=3 \cdot 10^5$  через сопротивление утечки  $R=50$  Мом. Эквивалентная емкость собирающего электрода по отношению к земле  $C=40$  пф. Амплитуда собственных шумов на выходе усилителя составляет 10 в. Можно ли с помощью этой аппаратуры зарегистрировать космическую частицу, которая пролетает в камере путь в 10 см?

23. Вычислить максимальную величину импульса, возникающего в плоскопараллельной ионизационной камере, при попадании в нее  $\alpha$ -частицы  $\text{Th}^{232}$ . Камера наполнена аргонном до давления, при котором пробег  $\alpha$ -частицы полностью укладывается в рабочем объеме камеры. Эквивалентная емкость собирающего электрода камеры по отношению к земле  $C=20$  пф. Сопротивление утечки принять равным 100 Мом. Источник  $\alpha$ -частиц расположен непосредственно на электроде камеры.

24. В плоской ионизационной камере, наполненной аргонном до давления  $p=500$  мм рт. ст., на расстоянии 1 см от отрицательного электрода перпендикулярно силовым линиям поля пролетает  $\alpha$ -частица эманации радия  $\text{Rn}^{222}$ . Расстояние  $d$  между электродами камеры равно 3 см; напряжение  $V$ , приложенное к ним, составляет 600 в; эквивалентная емкость собирающего электрода по отношению к земле  $C=50$  пф. Построить зависимость величины импульса на собирающем электроде от времени, если сопротивление утечки  $R=10^8$  ом.

25. В плоской ионизационной камере, наполненной аргонном до давления  $p=500$  мм рт. ст., на расстоянии 1 см от отрицательного электрода перпендикулярно силовым линиям поля пролетает  $\alpha$ -частица  $\text{Po}^{210}$ . Расстояние  $d$  между электродами камеры равно 3 см, напряжение  $V$ , приложенное к ним, составляет 600 в. Эквивалентная емкость собирающего электрода по отношению к земле  $C=50$  пф. Построить зависимость величины импульса на собирающем электроде камеры от времени, если сопротивление утечки  $R=10^5$  ом. Как изменится разрешающая способность камеры, если к аргону добавить 5%  $\text{CO}_2$ ?

26. В плоской ионизационной камере, наполненной аргонном до давления  $p=495$  мм рт. ст., параллельно силовым линиям поля пролетает  $\alpha$ -частица  $\text{U}^{238}$ . Расстояние  $d$  между электродами камеры равно 3 см; напряжение  $V$ , приложенное к ним, составляет 750 в; эквивалентная емкость собирающего электрода по отношению к земле  $C=50$  пф. Оценить величину импульса на собирающем электроде камеры, если камера подключена к усилителю через сопротивление утечки  $R=2 \cdot 10^5$  ом.

27. В плоской ионизационной камере, наполненной аргонном до давления  $p=760$  мм рт. ст., параллельно силовым линиям поля пролетает  $\alpha$ -частица  $\text{Ra}^{226}$ . Расстояние  $d$  между электродами камеры равно 6 см. Напряжение  $V$ , приложенное к ним, составляет 1140 в. Камера подключена к усилителю через сопротивление утечки  $R=100$  Мом. Эквивалентная емкость собирающего электрода по отношению к земле  $C=20$  пф. Построить зависимость величины импульса на собирающем электроде от времени в двух случаях:

а) источник  $\alpha$ -частиц расположен на отрицательном электроде;

б) источник  $\alpha$ -частиц расположен на положительном электроде.

Как объяснить получившийся результат?

28. В плоской ионизационной камере, наполненной чистым аргонном до давления  $p=760$  мм рт. ст., параллельно силовым линиям поля пролетает  $\alpha$ -частица  $\text{Ra}^{226}$ . Расстояние  $d$  между электродами камеры равно 6 см. Напряжение  $V$ , приложенное к ним, составляет 1140 в. Камера подключена к усилителю через сопротивление утечки  $R=50$  ком. Эквивалентная емкость собирающего электрода по отношению к земле во включенном состоянии составляет 50 пф. Построить зависимость величины импульса на собирающем электроде камеры от времени в двух случаях:

а) источник  $\alpha$ -частиц расположен на отрицательном электроде;

б) источник  $\alpha$ -частиц расположен на положительном электроде.

Как объяснить получившийся результат?

29. В плоской ионизационной камере с электронным собиранием имеется входное окно диаметром  $0,3 \text{ мм}$ , за которым на расстоянии  $1 \text{ см}$  установлен источник  $\alpha$ -частиц с энергией  $5 \text{ Мэв}$ . Камера наполнена аргоном до давления  $p=500 \text{ мм рт. ст.}$  Расстояние  $d$  между электродами камеры равно  $5 \text{ см}$ . Источник находится на расстоянии  $1/5 d$  от отрицательного электрода. Окно закрыто слюдой толщиной  $16,5 \text{ мк}$ . Найти разброс импульсов по амплитудам (рис. 2).

30. В плоской ионизационной камере с электронным собиранием имеется входное окно, за которым на расстоянии  $1 \text{ см}$  установлен источник  $\alpha$ -частиц с энергией  $6,25 \text{ Мэв}$  (см. рис. 2). Оценить, каков должен быть диаметр окна  $x$ ,

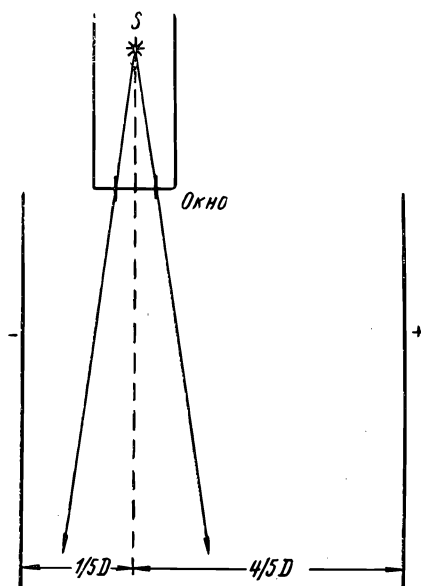


Рис. 2.

при условии, что разброс амплитуд импульсов не должен превышать  $2\%$ . Камера наполнена аргоном до давления  $p=300 \text{ мм рт. ст.}$  Расстояние  $d$  между электродами камеры равно  $45 \text{ мм}$ . Источник находится на расстоянии  $1/5 d$  от отрицательного электрода. Окно закрыто слюдой толщиной  $11 \text{ мк}$ .

31. В ионизационной камере с плоскими электродами имеется входное окно из алюминиевой фольги, расположенное на равном расстоянии от электродов. Оценить толщину окна при условии, что амплитуда импульса должна быть не

менее 200 мкв. Камера наполнена аргоном до давления  $p=2$  атм. Расстояние  $d$  между электродами камеры равно 2 см. Напряжение  $V$ , приложенное к ним, составляет 600 в. Эквивалентная емкость собирающего электрода по отношению к земле во включенном состоянии  $C=50$  пф. Сопротивление утечки  $R=100$  ком. Источник  $\alpha$ -частиц с энергией 6,3 Мэв расположен непосредственно над фольгой. Разбросом в амплитудах импульсов пренебречь.

32. Сравнить величину импульса от  $\alpha$ -частиц  $\text{Th}^{227}$  в двух ионизационных камерах, одна из которых наполнена чистым аргоном, а другая смесью из аргона и 5% углекислого газа. Давление в каждой камере  $p=2$  атм. Расстояние  $d$  между электродами каждой камеры равно 2 см; напряжение  $V$ , приложенное к ним, составляет 600 в. Частицы летят коллимированным пучком вдоль отрицательного электрода. Эквивалентная емкость собирающего электрода по отношению к земле  $C=40$  пф. Сопротивление утечки  $R=100$  ком. Как объяснить получившийся результат?

33. Сравнить величину импульса от  $\alpha$ -частиц  $\text{Th}^{227}$  в двух ионизационных камерах, одна из которых наполнена чистым аргоном, а другая смесью из аргона и 5% углекислого газа. Давление в каждой камере  $p=2$  атм. Расстояние  $d$  между электродами каждой камеры равно 2 см; напряжение  $V$ , приложенное к ним, составляет 600 в. Частицы летят коллимированным пучком вдоль отрицательного электрода. Эквивалентная емкость собирающего электрода по отношению к земле  $C=40$  пф. Сопротивление утечки  $R=10$  ком. Объяснить получившийся результат.

34. Построить дифференциальное и интегральное распределение импульсов по амплитудам в плоской ионизационной камере с электронным собиранием от монохроматических  $\alpha$ -частиц, испускаемых бесконечно тонким плоским источником, расположенным в центре одного из электродов. Считать, что  $RC \gg T_e$  ( $T_e$  — время собирания электронов), пробег  $\alpha$ -частицы равен расстоянию между электродами. Зависимостью удельной ионизации от пробега  $\alpha$ -частицы пренебречь. Расчет произвести для двух вариантов: а) источник  $\alpha$ -частиц расположен на отрицательном электроде; б) источник  $\alpha$ -частиц находится на положительном электроде.

35. Построить дифференциальное распределение импульсов по амплитудам в плоской ионизационной камере с электронным собиранием. Источник  $\alpha$ -частиц  $\text{Po}^{210}$  активностью 81 мккюри расположен в центре отрицательного электрода. Камера наполнена аргоном до давления  $p=2,2$  атм. Расстояние  $d$  между электродами камеры равно 2 см. Эквивалентная емкость собирающего электрода по отношению к земле во включенном состоянии  $C=50$  пф. Импульс с камеры поступает на вход линейного усилителя с коэффициентом уси-

ления  $K=1,4 \cdot 10^5$ . Импульсы регистрируются 100-канальным амплитудным анализатором с шириной канала в 1 в. Время измерения 10 мин. Источник считать точечным.

36. Определить скорость счета  $\alpha$ -частиц в плоской ионизационной камере от источника толщиной  $l$  и площадью  $S$ , если число распадов в секунду на единицу объема слоя составляет  $n$ . Расчет произвести для двух вариантов:

а) толщина слоя  $l$  много больше пробега  $\alpha$ -частиц  $R_\alpha$  — «бесконечно толстый слой»;

б) толщина слоя  $l$  много меньше пробега  $\alpha$ -частиц  $R_\alpha$  — «бесконечно тонкий слой».

37. В плоской ионизационной камере с сеткой (рис. 3) расстояние между электродом с источником  $\alpha$ -частиц и сеткой —  $d_1$ , расстояние между сеткой и собирающим электродом —  $d_2$ , при этом  $d_2=1/2 d_1$ . Разность потенциалов между электродом с источником  $\alpha$ -частиц и сеткой —  $V_1$ , разность

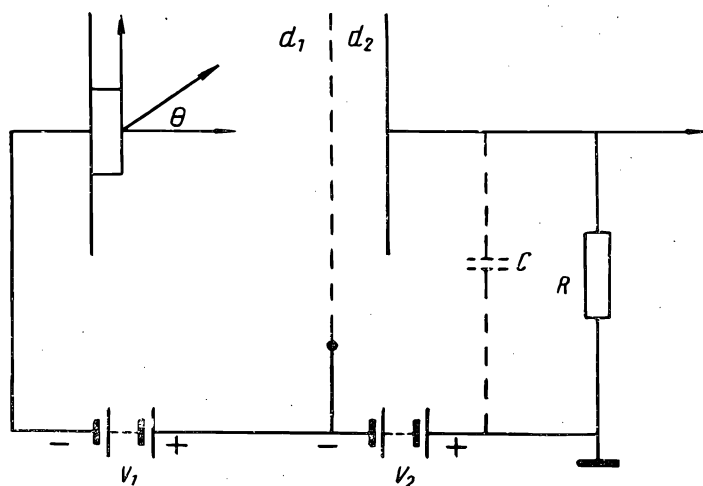


Рис. 3.

потенциалов между сеткой и собирающим электродом —  $V_2$ , причем  $V_2=1/2 V_1$ . Пробег  $\alpha$ -частиц равен  $d_1$ . Построить зависимость величины импульса на собирающем электроде от времени для двух крайних случаев:

а) угол  $\theta$  между направлением полета  $\alpha$ -частиц и силовыми линиями поля равен  $0^\circ$ ;

б) угол  $\theta=90^\circ$ .

Зависимостью ионизации от пробега  $\alpha$ -частиц пренебречь.

38. Для калибровки плоской ионизационной камеры с сеткой используются  $\alpha$ -частицы  $\text{Po}^{210}$ . Источник  $\alpha$ -частиц тол-

щиной  $1\text{ мк}$  расположен на отрицательном электроде камеры. Над ним на расстоянии  $0,1\text{ мм}$  находятся дюзы с диаметром ячейки  $100\text{ мк}$ . Дюзы изготовлены из алюминиевой фольги толщиной  $1\text{ мм}$ . Камера наполнена аргоном до давления  $p=2,2\text{ атм}$ . Расстояние  $d$  между электродом с источником и сеткой равно  $2\text{ см}$ . Эквивалентная емкость собирающего электрода по отношению к земле во включенном состоянии  $C=50\text{ пф}$ . Определить разрешение по энергии в этой камере.

39. На электроде ионизационной камеры нанесено  $2\text{ мг}$   $\text{Pu}^{239}$ . В камере регистрируются осколки деления, возникающие при облучении  $\text{Pu}^{239}$  тепловыми нейтронами. Средняя энергия осколка деления  $60\text{ Мэв}$ . Так как  $\text{Pu}^{239}$  обладает естественной радиоактивностью, в камере помимо осколков деления возникают  $\alpha$ -частицы. Если число  $\alpha$ -частиц, испускаемых в единицу времени, достаточно велико, то за время разрешения  $\tau$  будет происходить наложение  $\alpha$ -частиц. Тогда результирующий импульс может оказаться сравнимым с импульсами, обусловленными осколками деления. Разрешающее время камеры равно  $0,5\text{ мксек}$ . В какой поток тепловых нейтронов нужно поместить эту камеру для того, чтобы скорость счета осколков деления превышала скорость счета  $n$ -кратно наложенных  $\alpha$ -частиц в  $100$  раз?

40. На электроде плоской ионизационной камеры нанесено  $200\text{ мг}$  урана и регистрируются осколки, возникающие при спонтанном делении  $\text{U}^{238}$ . Импульсы регистрируются самописцем, лента которого перемещается на  $5\text{ см}$  в час. Какое количество импульсов должно быть записано на  $5\text{ м}$  ленты? Найти вероятность получить заданное число импульсов в час. Построить график распределения, т. е. вероятность получить данное число импульсов в зависимости от числа импульсов.

41. Выразить в процентах ошибку, возникающую вследствие пропусков частиц в ионизационной камере со временем разрешения  $\tau=8\text{ мксек}$ , при скорости счета  $N=15\,000\text{ имп/сек}$ . При какой скорости счета пропуски не будут превышать  $1\%$ ?

42. За  $1\text{ час}$  измерений в импульсной ионизационной камере зарегистрировано  $12\,000\text{ имп}$ . Вычислить скорость счета (число импульсов в  $\text{сек}$ ) и ее абсолютную и относительную ошибки. Каким временем измерения можно ограничиться, если допустимая относительная ошибка измерения составляет  $2\%$ ;  $5\%$ ?

43. На одном из электродов плоской ионизационной камеры нанесено  $100\text{ мг}$  нептуния и регистрируются осколки, возникающие при спонтанном делении  $\text{Np}^{237}$ . Импульсы записываются самописцем. Определить скорость перемещения самописца, если среднее расстояние между импульсами должно быть не менее  $5\text{ мм}$ . Какое количество ленты необходимо для

того, чтобы относительная ошибка измерения была бы не более 3%?

### Пропорциональный счетчик

В пропорциональном счетчике первичная ионизация, созданная заряженными частицами, может быть значительно усилена за счет неупругих соударений электронов с молекулами газа. В этом счетчике напряженность электрического поля настолько велика, что электрон в промежутках между тепловыми соударениями с молекулами газа может приобрести энергию, необходимую для ионизации ударом. Таким образом в счетчике возникает газовое усиление. Этот процесс характеризуется коэффициентом ударной ионизации  $\alpha$ , который зависит от напряженности электрического поля  $E$  и давления газа в счетчике  $p$  следующим образом:

$$\alpha = A p e^{-\frac{B}{E p}},$$

где  $A$  и  $B$  — коэффициенты, постоянные для данного газа. В счетчике с плоскопараллельными электродами полное число пар ионов, образованных в электронно-ионной лавине к тому моменту, когда все электроны соберутся на аноде, можно определить следующим образом:

$$N(x) = N_0 e^{\alpha x},$$

где  $x$  — расстояние от плоскости, в которой заряженной частицей было создано  $N_0$  пар ионов, до анода. Вторым параметром, характеризующим процесс возникновения электронно-ионных лавин, является коэффициент газового усиления  $m = \frac{N}{N_0}$ , где  $N$  — полное число пар ионов, пришедших на электроды счетчика. В случае электродов цилиндрической или сферической формы коэффициент газового усиления может быть рассчитан по формуле

$$m = e^{\int_{r_a}^{r_{кр}} \alpha(r) dr},$$

где  $r_{кр}$  — критический радиус, определяющий размеры области, в которой коэффициент ударной ионизации  $\alpha(r)$  отличен от нуля;  $r_a$  — радиус анода. Полный коэффициент газового усиления  $M$  (с учетом вторичных эффектов) выражается через коэффициент  $m$  следующим образом:

$$M = \frac{m}{1 + \gamma m},$$

где  $\gamma$  — коэффициент, характеризующий вероятность вторичных процессов.

Зависимость величины импульса напряжения на эквивалентной емкости от времени для цилиндрического пропорционального счетчика можно представить в виде

$$\Delta V(t) = \frac{mq_0}{C} \cdot \frac{1}{2 \ln \frac{r_k}{r_a}} e^{-\frac{t}{RC}} \int_0^t e^{\frac{t}{RC}} \frac{dt}{t + t_0},$$

где  $t_0 = \frac{r_a^2 \ln \frac{r_k}{r_a}}{2K_+ V}$ . Если  $RC \gg T_+$ , то форма импульса задается выражением

$$\Delta V(t) = \frac{mq_0}{C} \cdot \frac{1}{2 \ln \frac{r_k}{r_a}} e^{-\frac{t+t_0}{RC}} \left[ \ln \left( \frac{t}{t_0} + 1 \right) + \frac{t}{RC} + \dots \right].$$

При  $R = \infty$  форму импульса можно выразить следующим образом:

$$\Delta V(T) = \frac{mq_0}{C} \cdot \frac{1}{2 \ln \frac{r_k}{r_a}} \ln \left( \frac{t}{t_0} + 1 \right).$$

Амплитудное значение импульса при  $R = \infty$  составляет величину

$$\Delta V(T_+) = M \frac{q_0}{C}.$$

Время собирания положительных ионов можно рассчитать по формуле

$$T_+ = t_0 \left( \frac{r_k^2}{r_a^2} - 1 \right).$$



**44.** Через плоский пропорциональный счетчик перпендикулярно силовым линиям поля пролетают заряженные частицы. Частица 1 пролетает на расстоянии 1 см от положительного электрода, частица 2 — на расстоянии 1 см от отрицательного электрода (рис. 4). Сравните амплитуды импульсов от этих частиц, если расстояние  $d$  между электродами равно 6 см, а коэффициент ударной ионизации  $\alpha$  равен 3.

**45.** Вычислить величину коэффициента газового усиления  $M$ , необходимого для регистрации электронов с энергией 50 кэв, которые всю энергию расходуют в газе пропорционального счетчика. Эквивалентная емкость собирающего электрода по отношению к земле во включенном состоянии  $C = 20$  пф. Чувствительность усилителя составляет 1 мв. Счетчик наполнен аргоном.



46. Оценить коэффициент газового усиления  $M$  пропорционального счетчика, наполненного газом  $\text{BF}_3$ , если максимальная амплитуда импульсов на выходе линейного усилителя с коэффициентом усиления  $K=3 \cdot 10^5$  при счете медлен-

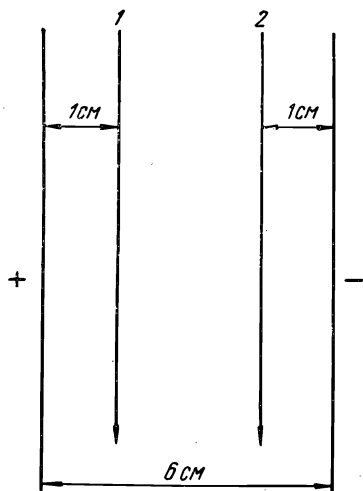


Рис. 4.

ных нейтронов составляет 90 в. Емкость нити счетчика по отношению к земле во включенном состоянии равна 20 пф.

47. Пропорциональный счетчик, наполненный газом  $\text{BF}_3$  до давления  $p=2$  атм, облучается тепловыми нейтронами. Счетчик имеет диаметр  $D=3$  см, длину  $l=25$  см. Оценить долю тепловых нейтронов, поглощенных в рабочем объеме счетчика в двух случаях:

а) поток нейтронов  $N_0$  направлен перпендикулярно оси счетчика;

б) поток нейтронов  $N_0$  направлен параллельно оси счетчика.

48. Пропорциональный счетчик, наполненный газом  $\text{BF}_3$  до давления 550 мм рт. ст., регистрирует тепловые нейтроны, поток которых направлен перпендикулярно оси счетчика. Диаметр счетчика  $D=2$  см. Оценить эффективность регистрации тепловых нейтронов.

49. Эффективность пропорционального счетчика, наполненного газом  $\text{BF}_3$ , для тепловых нейтронов составляет 4%. Как изменится эффективность счетчика при переходе от тепловых нейтронов к нейтронам с энергией 0,4 эв? До какого процентного содержания нужно довести количество  $\text{B}^{10}$  в естественной смеси изотопов (обогатить газ), чтобы довести эффективность счетчика до ее прежнего значения?

50. Оценить скорость счета в каждом из каналов 15-канального амплитудного анализатора, регистрирующего импульсы от пропорционального счетчика диаметром  $D=3$  см, длиной  $l=10$  см и наполненного газом  $\text{CH}_4$  до давления  $p=2$  атм. Счетчик регистрирует нейтроны с энергией 4 Мэв. Поток нейтронов направлен вдоль оси счетчика и составляет  $10^4$  нейтрон/(см<sup>2</sup>·сек). Как нужно изменить давление в счетчике, чтобы скорость счета возросла в 10 раз?

51. Определить зависимость коэффициента газового усиления  $M$  в цилиндрическом пропорциональном счетчике от величины напряжения, приложенного к его электродам.

52. Объяснить, почему в счетчиках, наполненных чистыми инертными газами, трудно получить хорошее разрешение по энергии при значениях коэффициента газового усиления более 100.

53. Оценить эффективность пропорционального счетчика, предназначенного для регистрации тепловых нейтронов, поток которых направлен перпендикулярно оси счетчика. Стенки счетчика выложены бором, толщина слоя которого в 10 раз больше пробега  $\alpha$ -частиц в боре. Счетчик наполнен аргоном.

54. Пропорциональным счетчиком измерялись импульсы от короткоживущего радиоактивного изотопа. Время каждого измерения составляло 1 мин. Результаты измерения приведены в таблице.

Время начала измерения, мин	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Число распадов	970	781	673	525	464	391	305	270	204	164

Начертить расчетную кривую распада. Поставить экспериментальные точки и погрешности измерения. Вычислить постоянную распада  $\lambda$  и число радиоактивных атомов  $N_0$ .

### Счетчик Гейгера

В счетчике Гейгера ионизирующее излучение вызывает вспышку коронного газового разряда. Возникновение самостоятельного газового разряда возможно только при значениях напряжения  $V \geq V_{\text{зж}}$ . Напряжение зажигания  $V_{\text{зж}}$  зависит от радиуса электродов  $r_a$  и  $r_k$ , природы газа, наполняющего газоразрядный промежуток (постоянные коэффициенты  $u$  и  $n\lambda_0$ ), и его давления  $p$  следующим образом:

$$V_{\text{зж}} = \frac{u \ln \frac{r_k}{r_a}}{\ln \left( 1 + \frac{n\lambda_0}{pr_a} \right)}.$$

Сила тока  $I$  коронного разряда в достаточно хорошем приближении может быть представлена в виде

$$I = \frac{V - V_{\text{зж}}}{R_{\text{вн}}},$$

где  $V - V_{\text{зж}}$  — перенапряжение на счетчике;

$R_{\text{вн}} = \frac{r_{\text{к}}^2 \ln \frac{r_{\text{к}}}{r_{\text{а}}}}{2K_{\perp} V_{\text{зж}} l}$  — внутреннее сопротивление счетчика;  
 $l$  — длина газоразрядного промежутка.

Форма импульса в счетчике Гейгера задается выражением

$$\Delta V(t) = \frac{R}{R + R_{\text{вн}}} (V_0 - V_{\text{зж}}) \left( 1 - e^{-\frac{R + R_{\text{вн}}}{R R_{\text{вн}} C} t} \right).$$

В том случае, когда  $R \gg R_{\text{вн}}$ , выражение для величины импульса существенно упрощается:

$$\Delta V(t) = (V_0 - V_{\text{зж}}) \left( 1 - e^{-\frac{t}{R_{\text{вн}} C}} \right).$$

В самогасящемся счетчике для наиболее интересного интервала времени от момента возникновения разряда до завершения активной стадии зависимость величины импульса от времени имеет вид

$$\Delta V(t) = \frac{qv}{2Cl \ln \frac{r_{\text{к}}}{r_{\text{а}}}} e^{-\frac{t}{RC}} \int_0^t e^{\frac{t}{RC}} \ln \left( \frac{t}{t_0} + 1 \right) dt,$$

где  $q$  — полное количество электричества, выделяющееся в разряде;  $v$  — скорость распространения разряда вдоль нити;  $l$  — длина нити счетчика. Если сопротивление утечки настолько мало, что ионным током, протекающим через емкость, можно пренебречь, то выражение для формы импульса упрощается:

$$\Delta V(t) = \frac{qv}{2l \ln \frac{r_{\text{к}}}{r_{\text{а}}}} R \ln \left( \frac{t}{t_0} + 1 \right).$$

Для возникновения газового разряда в счетчике Гейгера достаточно, чтобы в его рабочем объеме возник хотя бы один свободный электрон. Тогда эффективность регистрации заряженных частиц счетчиком Гейгера можно определить как вероятность образования в газоразрядном промежутке хотя бы одной пары ионов:

$$\eta = 1 - e^{-v_0 p l},$$

где  $\nu_0$  — первичная удельная ионизация;  $l$  — средний путь частицы в счетчике;  $p$  — давление, выраженное в долях атмосферы.

---

55. Несамогасящийся счетчик Гейгера имеет диаметр катода  $D_k = 2$  см, диаметр анода  $D_a = 100$  мк и наполнен аргонном до давления  $p = 70$  мм рт. ст. Оценить амплитуду импульса, если на счетчик подано напряжение  $V = 830$  в.

56. При облучении источником № 1 скорость счета частиц в счетчике Гейгера  $N_1 = 950$  имп/сек, при облучении источником № 2 скорость счета  $N_2 = 870$  имп/сек, а при облучении двумя источниками одновременно скорость счета  $N_{12} = 1630$  имп/сек. Вычислить разрешающее время счетчика и определить погрешность этой величины.

57. Оценить число молекул гасящего газа диссоциирующих в одном разряде, если амплитуда импульса на выходе самогасящегося счетчика равна  $\Delta V = 10$  в, а эквивалентная емкость  $C = 20$  пф.

58. Оценить срок службы самогасящегося счетчика Гейгера, имеющего диаметр  $D = 2$  см, длину  $l = 20$  см и наполненного до давления  $p = 100$  мм рт. ст. смесью из аргона (90%) и паров спирта (10%), если счетчик считается выведенным из строя после того, как продиссоциирует примерно 80% молекул гасящего газа.

59. Счетчиком Гейгера с временем разрешения  $\tau = 120$  мксек сосчитано в течение 1 мин 110 400 импульсов. Счетчик имеет диаметр  $D = 2$  см и длину  $l = 20$  см. Оценить активность источника заряженных частиц в мккюри, если счетчик расположен на расстоянии 1 м от источника. Размеры источника много меньше размеров счетчика.

60. Оценить эффективность регистрации счетчиком Гейгера  $\gamma$ -квантов, если в течение 3 мин счетчик зарегистрировал 21 200 импульсов. Счетчик имеет форму цилиндра диаметром  $D = 20$  мм, длиной  $l = 180$  мм и находится на расстоянии 300 мм от источника активностью 200 мккюри. Размеры источника много меньше размеров счетчика.

61. Найти вероятность того, что релятивистский электрон, проходящий через счетчик Гейгера перпендикулярно его оси, не будет зарегистрирован счетчиком. Счетчик имеет форму цилиндра с диаметром  $D = 2$  см и наполнен аргонном до давления  $p = 55$  мм рт. ст.

62. Счетчик Гейгера имеет диаметр  $D = 2$  см и наполнен аргонном до давления  $p = 110$  мм рт. ст. Вычислить эффективность регистрации счетчиком космических частиц, летящих перпендикулярно оси счетчика. Произвести то же вычисление для счетчика, наполненного водородом до того же давления.

63. С помощью телескопа из трех счетчиков измерялась эффективность регистрации счетчиком Гейгера космических частиц. Для этого в течение одного часа проводилось измерение числа импульсов совпадений от всех трех счетчиков и от двух крайних счетчиков (рис. 5). Получили следующие результаты: число двойных совпадений  $N_{1,3} = 618$ ; число

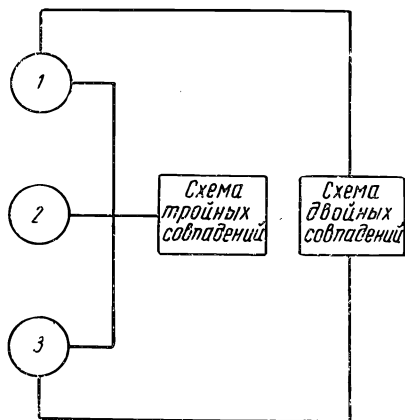


Рис. 5.

тройных совпадений  $N_{1,2,3} = 586$ . Вычислить эффективность среднего счетчика и ее абсолютную и относительную ошибки.

64. Оценить пропуски в числе релятивистских частиц, регистрируемых телескопом из счетчиков Гейгера (см. рис. 5), если счетчики 1 и 3 наполнены аргоном до давления  $p = 150$  мм рт. ст. и имеют диаметр  $D = 1$  см, а счетчик 2 наполнен водородом до давления  $p = 200$  мм рт. ст. и его диаметр  $D = 2$  см.

65. Счетчик Гейгера, имеющий медные стенки толщиной 200 мк, наполнен воздухом до давления  $p = 1$  атм. Сравнить долю  $\gamma$ -квантов  $\text{Co}^{60}$ , поглощенных в стенках и газе счетчика, если диаметр счетчика  $D = 2$  см, а поток  $\gamma$ -квантов направлен перпендикулярно оси счетчика.

66. Оценить минимальную энергию  $\alpha$ -частиц, которые может зарегистрировать счетчик Гейгера, имеющий окошко из медной фольги толщиной 5 мк.

67. Электроны  $\text{In}^{112}$  регистрируются счетчиком Гейгера, стенки которого сделаны из алюминия толщиной 150 мк. Оценить долю электронов, поглощенных в стенках. Поток электронов направлен перпендикулярно оси счетчика цилиндрической формы.

68. Определить допустимую скорость счета в несамогасящемся счетчике Гейгера при условии, что пропуски частиц,

связанные с конечным временем разрешения счетчика, не должны превышать 1%. Расчет провести для двух случаев:

а) счетчик работает с сопротивлением утечки  $R=10^3 \text{ Мом}$ , эквивалентная емкость анода счетчика по отношению к земле во включенном состоянии  $C=20 \text{ пф}$ ;

б) гашение производится схемой гашения, при этом длительность гасящего импульса равна  $\tau=400 \text{ мксек}$ .

Оценить время измерения для каждого случая, необходимое для того, чтобы величина относительной ошибки измерения была бы не более 3%.

69. Сколько импульсов может зарегистрировать в течение одной минуты несамогасящийся счетчик Гейгера, наполненный аргоном. Геометрические размеры счетчика: диаметр катода  $D_k = 20 \text{ мм}$ , длина счетчика  $l=20 \text{ см}$ . Внешнее сопротивление утечки  $R=100 \text{ Мом}$ , эквивалентная емкость анода счетчика по отношению к земле во включенном состоянии  $C=30 \text{ пф}$ . Счетчик облучается источником заряженных частиц, находящимся на расстоянии  $50 \text{ см}$  от середины счетчика. Активность источника  $300 \text{ мккюри}$ .

70. Оценить минимальную длительность гасящего импульса в счетчике Гейгера, имеющего диаметр катода  $D_k=2 \text{ см}$ , диаметр анода  $D_a=200 \text{ мк}$  и наполненного аргоном до давления  $p=110 \text{ мм рт. ст.}$  Напряжение  $V$ , приложенное к электродам счетчика, составляет  $900 \text{ в}$ .

71. Счетчик Гейгера регистрирует импульсы от радиоактивного источника. Совместно с импульсами от источника регистрируются импульсы фона, которые составляют 10% общего числа импульсов, зарегистрированных счетчиком. Сколько импульсов должен зарегистрировать счетчик Гейгера только от источника для того, чтобы величина относительной ошибки при определении числа импульсов, сосчитанных только от источника, не превышала 2%;

72. Счетчиком Гейгера в течение одной минуты регистрируются импульсы от радиоактивного источника и фона. При этом фон составляет 25% числа импульсов только от радиоактивного источника. Каким временем разрешения должен обладать счетчик Гейгера, чтобы пропуски при регистрации частиц от радиоактивного источника не превышали 2%, причем величина относительной ошибки при определении числа импульсов только от источника была бы не более 1%?

73. Цилиндрический счетчик Гейгера диаметром  $D=2 \text{ см}$ , длиной  $l=20 \text{ см}$  регистрирует импульсы от  $\gamma$ -квантов. Источник находится на расстоянии  $50 \text{ см}$  от счетчика и расположен таким образом, что  $\gamma$ -кванты летят перпендикулярно оси цилиндра. Импульсы от источника регистрируются совместно с импульсами фона, которые составляют 25% числа импульсов только одного источника. Время измерения равно  $1 \text{ мин.}$

Какова должна быть интенсивность источника  $\gamma$ -квантов для того, чтобы относительно ошибка при измерении числа импульсов от этого источника была не более 2%? Время разрешения счетчика  $\tau = 50$  мксек. Эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов этим счетчиком  $\eta = 0,3\%$ .

### Кристаллические детекторы

В кристаллах с сильными электронными связями неупругие соударения заряженной частицы с кристаллической решеткой приводят к образованию носителей электрических зарядов в виде свободных электронов и отвечающих им освобожденных уровней — дырок. В кристаллическом детекторе на изоляторах амплитуда импульса на собирающем электроде будет определяться при прочих равных условиях отношением средней разности потенциалов  $V_-$  и  $V_+$ , которую проходят свободные носители электрических зарядов в направлении силовых линий электрического поля до захвата их ловушками, к полной разности потенциалов  $V_0$  между электродами детектора:

$$\Delta V_{\text{макс}} \approx \frac{q_0}{C} \cdot \frac{V_- + V_+}{V_0}.$$

В случае плоской геометрии это отношение может быть рассчитано как

$$\Delta V_{\text{макс}} = \frac{u_- T'_- + u_+ T'_+}{d},$$

где  $u_- T'_-$  и  $u_+ T'_+$  — средняя длина переноса электронов и дырок соответственно;  $T'_-$  и  $T'_+$  — время жизни носителей зарядов до захвата их ловушками. Если в кристаллическом детекторе дырки не обладают подвижностью и остаются закрепленными на своих местах, амплитуда импульса определяется только движением свободных электронов и равна

$$\Delta V_{\text{макс}} \approx \frac{u_- T'_-}{d},$$

где  $d$  — расстояние между электродами детектора.

Возможность использования полупроводникового кристалла в качестве детектора частиц зависит от отношения числа носителей электрических зарядов, образованных регистрируемой частицей, к величине флуктуаций постоянного тока, которые определяются среднеквадратичным отклонением от среднего числа носителей, участвующих в протекании постоянного тока через детектор за время собирания носителей от регистрируемых частиц. Это среднеквадратичное отклонение равно  $\sqrt{\frac{V_0 T}{e R_{\text{кр}}}}$ , где  $V_0$  — разность потенциалов между электродами детектора;  $R_{\text{кр}}$  — сопротивление кристалла;  $T$  — время разрешения полупроводникового детектора.

Величину  $R_{кр}$  можно оценить, зная удельное сопротивление полупроводника и его размеры:  $R_{кр} = \rho \frac{l}{S}$ , где  $\rho$  — удельное сопротивление,  $l$  — толщина,  $S$  — площадь детектора. Удельное сопротивление полупроводника определяется через концентрации свободных носителей электрических зарядов и их подвижности  $K_-$  и  $K_+$  следующим образом:

$$\rho = \frac{1}{e(nK_- + pK_+)},$$

где  $n$  — концентрация электронов в зоне проводимости кристалла;  $p$  — концентрация дырок в валентной зоне. В идеальном чистом полупроводнике (при абсолютном отсутствии примесей) концентрация свободных электронов и дырок одинакова:  $n=p$  и при заданной ширине запрещенной зоны  $q$  зависит только от температуры кристалла. Концентрация электронов (или дырок) для этого случая может быть рас-

считана по формуле:  $n \approx 10^{19} e^{-\frac{q}{kT}}$ , где  $k$  — постоянная Больцмана. Наличие примесей снижает сопротивление реальных кристаллов. Повысить сопротивление полупроводникового детектора можно, используя потенциальный барьер, возникающий в переходном слое, который образуется в месте соприкосновения двух материалов, из которых один обладает электронной проводимостью, а другой — дырочной. В детекторах такого типа ширина области перехода  $d$  (она же является рабочей областью детектора) зависит от приложенной разности потенциалов  $V$ . Для приближенного расчета протяженности переходной области можно воспользоваться соотношением

$$d \approx \sqrt{10^{-9} \rho (V + V_0)},$$

где  $V_0$  — разность потенциалов на границе переходной области в отсутствие обратного смещения. Носители, образованные регистрируемой частицей вне переходной области, могут попасть в нее только в результате такого медленного процесса, как диффузия. Время  $t$ , за которое носители диффундируют на расстояние  $l$ , можно определить из следующего соотношения:  $l = \sqrt{Dt}$ , где  $D$  — коэффициент диффузии.

74. Рассчитать величину импульса, возникающего в полупроводниковом поверхностно-барьерном детекторе из кремния, при облучении его  $\alpha$ -частицами  $Pu^{239}$ . Толщина чувствительного слоя полупроводникового детектора 40 мк. Эквивалентная емкость собирающего электрода детектора по отношению к земле во включенном состоянии  $C = 100$  пф.

75. Рассчитать величину амплитуды импульса, возникающего в полупроводниковом поверхностно-барьерном детек-



торе из германия при облучении его  $\alpha$ -частицами  $\text{Po}^{210}$ . Толщина чувствительного слоя полупроводникового детектора 30 мк. Эквивалентная емкость собирающего электрода детектора по отношению к земле во включенном состоянии  $C=120$  пф.

76. Рассчитать время нарастания фронта импульса в полупроводниковом поверхностно-барьерном детекторе из кремния. Детектор облучается  $\alpha$ -частицами, которые падают перпендикулярно поверхности детектора со стороны отрицательного электрода. Напряжение смещения  $V_{\text{см}}$  между электродами кремниевого детектора составляет 10 в. Ширина чувствительного слоя равна 100 мк.

77. Полупроводниковый поверхностно-барьерный детектор из германия облучается  $\alpha$ -частицами, которые падают перпендикулярно поверхности детектора со стороны отрицательного электрода. Напряжение смещения  $V_{\text{см}}$  между электродами детектора 10 в. Ширина чувствительного слоя 100 мк. Рассчитать время нарастания фронта импульса.

78. Удельное сопротивление полупроводникового детектора из кремния с  $p$ — $p$ -переходом равно  $10^3$  ом·см. Определить ширину чувствительного слоя, если напряжение смещения  $V_{\text{см}}$  между электродами детектора равно 50 в.

79. Оценить величину удельного сопротивления полупроводниковых детекторов из чистого кремния и из чистого германия при комнатной температуре.

80. В полупроводниковом счетчике с  $p$ — $n$ -переходом, изготовленном на основе кремния  $p$ -типа, на расстоянии 0,5 мм от чувствительного слоя перпендикулярно силовым линиям поля пролетела заряженная частица. Каким временем жизни должны обладать образовавшиеся носители зарядов, чтобы дойти до области  $p$ — $n$ -перехода?

81. Полупроводниковый детектор с  $p$ — $n$ -переходом облучается  $\alpha$ -частицами  $\text{Pu}^{239}$ . Поток частиц направлен параллельно силовым линиям электрического поля. Чувствительный слой образуется на расстоянии 0,5 мм от поверхности кристалла. Ширина чувствительной области  $d=15$  мк, разность потенциалов на границе  $p$ — $n$ -перехода  $V=0,5$  в, напряжение смещения  $V_{\text{см}}=30$  в, поверхность электрода  $S=0,5$  см<sup>2</sup>, удельное сопротивление полупроводника  $\rho=100$  ом·см. Какое сопротивление утечки следует выбрать при работе с этим детектором, чтобы собрать весь заряд, образуемый  $\alpha$ -частицами, на коллекторе?

82. В полупроводниковом поверхностно-барьерном детекторе из германия разность потенциалов на границе  $p$ — $n$ -перехода  $V_0=0,5$  в, ширина чувствительного слоя  $d=40$  мк, площадь поверхности электрода  $S=1$  см<sup>2</sup>. Как изменится величина амплитуды импульса в этом детекторе, если напря-

жение обратного смещения, приложенное к электродам, изменить с 10 в на 20 в?

83. Полупроводниковый детектор из кремния с удельным сопротивлением  $\rho = 2,5 \cdot 10^3 \text{ ом} \cdot \text{см}$  имеет толщину 0,2 мм, площадь поперечного сечения  $S = 0,25 \text{ см}^2$ . Оценить флуктуации в числе неосновных носителей зарядов (флуктуации величины постоянного тока), возникающие за время собирания носителей от регистрируемой частицы. Напряжение  $V$ , приложенное к электродам счетчика, составляет 60 в.

84. Полупроводниковый детектор из германия толщиной 0,1 мм площадью 0,5 см<sup>2</sup> регистрирует  $\alpha$ -частицы  $\text{Pu}^{239}$ . Напряжение  $V$ , приложенное к электродам счетчика, составляет 50 в. Удельное сопротивление детектора  $\rho = 10^4 \text{ ом} \cdot \text{см}$ . Время разрешения  $\tau = 10^{-7} \text{ сек}$ . Оценить величину отношения сигнала к шуму.

85. Полупроводниковый детектор, полученный методом диффузии лития в кристалл германия, предназначен для регистрации  $\gamma$ -квантов с энергией 800 кэв. Какова должна быть толщина полупроводникового детектора для того, чтобы эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов была бы не менее 1%? Оценить величину удельного сопротивления этого детектора, если напряжение  $V + V_0$  в рабочей области равно 50 в.

86. Сравнить отношение сигнала к шуму в полупроводниковых поверхностно-барьерных детекторах из  $n$ -кремния при регистрации  $\alpha$ -частиц  $\text{Po}^{210}$ . Разность потенциалов на границе чувствительного слоя у всех детекторов одинакова и равна  $V_{\text{см}} = 30 \text{ в}$ . Удельное сопротивление каждого детектора  $\rho = 3 \cdot 10^3 \text{ ом} \cdot \text{см}$ . Детекторы имеют следующие размеры:

1. Толщина чувствительного слоя  $d = 0,1 \text{ см}$ , площадь поперечного сечения  $S = 0,1 \text{ см}^2$ .

2.  $d = 0,1 \text{ мм}$ ,  $S = 0,1 \text{ см}^2$ .

3.  $d = 0,1 \text{ см}$ ,  $S = 1 \text{ см}^2$ .

87. Полупроводниковый детектор, полученный методом диффузии лития в кристалл германия, имеет чувствительный слой толщиной 600 мк. Оценить эффективность регистрации этим счетчиком  $\gamma$ -квантов  $\text{Co}^{60}$ .

88. Сравнить минимальное разрешение по энергии в импульсной ионизационной камере с сеткой и полупроводниковом детекторе при регистрации ими  $\alpha$ -частиц  $\text{Pu}^{239}$ .

### Сцинтилляционные счетчики

В сцинтилляционных счетчиках используется явление люминесценции, возникающее в некоторых веществах под действием ионизирующего излучения. В большинстве случаев интенсивность высвечивания сцинтиллятора  $I$  с течением времени  $t$  падает по экспоненциальному закону:

$$I(t) = I_0 e^{-t/\tau},$$

где  $\tau$  — время высвечивания сцинтиллятора. Если ионизирующая частица теряет в кристалле энергию  $\Delta\mathcal{E}$ , то число образовавшихся при этом фотонов можно определить следующим образом:

$$N_{h\nu} = \frac{\Delta\mathcal{E}\eta_{\Phi}}{h\nu},$$

где  $\eta_{\Phi}$  — конверсионная (физическая) эффективность сцинтиллятора,  $h\nu$  — энергия фотона. Как правило, сцинтилляторы достаточно прозрачны для собственного излучения, и значения конверсионной и технической эффективностей отличаются незначительно (коэффициент прозрачности  $\approx 1$ ). Тогда количество электронов, возникающих на катоде фотоумножителя можно определить из равенства

$$N_e = N_{h\nu} K \eta_k,$$

где  $K$  — коэффициент собирания света;  $\eta_k$  — квантовая эффективность фотокатода. Число же электронов, пришедших на анод в  $M$  раз больше:  $N_0 = N_e M$ . Коэффициент усиления  $M$  фотоэлектронного умножителя, имеющего  $n$  динодов с коэффициентами вторичной эмиссии  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ , можно оценить как  $M = \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_n$ . Если условия для вторичной эмиссии на всех динодах одинаковы, то коэффициент  $M$  можно записать в виде:  $M = \sigma^n$ .

Зависимость величины импульса от времени в сцинтилляционном счетчике выражается следующим образом:

$$\Delta V(t) = e^{-\frac{t}{RC}} \frac{1}{C} \int_0^t e^{\frac{t}{RC}} I(t) dt,$$

где  $I(t) = \frac{dQ(t)}{dt}$  — ток, который в каждый момент времени пропорционален числу высветившихся атомов. В том случае, когда высвечивание происходит по экспоненциальному закону, выражение для формы импульса имеет вид

$$\Delta V = \frac{q_0 R}{\tau - RC} \left( e^{-\frac{t}{\tau}} - e^{-\frac{t}{RC}} \right),$$

где  $q_0 = eN_0$ .

89. В спектре испускания кристаллов  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  наблюдаются две полосы с длинами волн в максимуме  $\lambda_1 = 450$  мкм и  $\lambda_2 = 380$  мкм. Определить, на какой глубине по отношению к зоне проводимости расположены уровни активатора, если излучение происходит при захвате электрона центром люминесценции.

90. Оценить число фотонов, испускаемых кристаллом  $\text{NaJ}(\text{Tl})$  при регистрации электронов с энергией 800 кэв.

91. Сцинтилляционный счетчик с кристаллом антрацена облучается электронами  $\beta$ -распада  $\text{Sr}^{90}$ . Оценить квантовую эффективность фотокатода умножителя с коэффициентом усиления  $M=10^6$ , если максимальная амплитуда импульса на его выходе составляет 14,5 в. Емкость анода фотоумножителя по отношению к земле во включенном состоянии  $C=10$  пф. Коэффициент собирания света считать равным 100%.

92. Сцинтилляционный счетчик с кристаллом  $\text{NaJ(Tl)}$  регистрирует электроны с энергией 1 Мэв. Квантовая эффективность фотокатода  $\eta_k=10\%$ . Емкость анода фотоумножителя по отношению к земле во включенном состоянии  $C=10$  пф. Оценить коэффициент усиления фотоумножителя, если сигнал с него подается на пересчетную схему чувствительностью 0,1 в. Коэффициент собирания света считать равным 90%.

93. Оценить коэффициент вторичной эмиссии  $\sigma$  на динодах фотоумножителя, если известно, что коэффициент усиления умножителя  $M=10^6$ , а число динодов  $n=13$ . Каковы будут флуктуации коэффициента усиления  $M$ , если напряжение питания стабилизировано с точностью до 0,1%, а в рабочем режиме коэффициент вторичной эмиссии  $\sigma$  меняется на 0,9% при изменении напряжения на 1%?

94. Как изменится темновой ток фотоэлектронного умножителя при охлаждении фотокатода: а) сухим льдом; б) жидким азотом?

95. Оценить эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов сцинтилляционным счетчиком с кристаллом  $\text{NaJ(Tl)}$ . Кристалл имеет форму цилиндра диаметром 30 мм, толщиной 10 мм. Поток  $\gamma$ -квантов с энергией 700 кэв направлен параллельно оси цилиндра. Какова должна быть толщина кристалла, эффективность которого для  $\gamma$ -квантов любой энергии была бы примерно 90%?

96. Определить величину импульса от электрона отдачи, если в результате рассеивания  $\gamma$ -кванта с энергией 600 кэв, его длина волны изменилась на 20%. Электроны регистрируются кристаллом антрацена. Квантовая эффективность фотоумножителя 10%. Коэффициент усиления  $M=10^6$ . Эквивалентная емкость анода фотоумножителя по отношению к земле во включенном состоянии  $C=10$  пф. Коэффициент собирания света считать равным 100%.

97. Оценить эффективность регистрации тепловых нейтронов сцинтилляционным счетчиком с кристаллом  $\text{LiJ(Tl)}$ . Кристалл имеет форму цилиндра диаметром  $D=30$  мм и высотой  $h=10$  мм. Оценку произвести для двух случаев:

- а) поток нейтронов направлен параллельно оси цилиндра;
- б) поток нейтронов направлен перпендикулярно оси цилиндра.

98. Оценить величину импульса на выходе фотоэлектронного умножителя, работающего с кристаллом  $\text{NaJ(Tl)}$  большого размера, при облучении его  $\gamma$ -квантами  $\text{Co}^{60}$ . Квантовая эффективность фотокатода умножителя 10%. Коэффициент усиления  $M=5 \cdot 10^5$ . Емкость анода фотоумножителя по отношению к земле во включенном состоянии  $C=10 \text{ нф}$ . Коэффициент собирания света считать равным 90%.

99. Оценить величину импульса на выходе фотоэлектронного умножителя, работающего со сцинтиллятором из порошка  $\text{ZnS(Ag)}$ , при регистрации  $\alpha$ -частиц  $\text{Po}^{218}$ . Квантовая эффективность фотокатода умножителя  $\eta_k=10\%$ ; коэффициент усиления  $M=10^5$ ; емкость собирающего электрода по отношению к земле во включенном состоянии  $C=8 \text{ нф}$ . Коэффициент собирания света считать равным 100%.

100. Величина конверсионной эффективности антрацена для быстрых электронов (энергия больше чем 1  $\text{Мэв}$ ) практически не зависит от их энергии и оказывается равной примерно 6%. Оценить величину конверсионной эффективности этого кристалла при регистрации  $\alpha$ -частиц с энергией 5  $\text{Мэв}$ , если величина импульса от этих частиц в 2,4 раза меньше амплитуды импульса от электронов с энергией 1,2  $\text{Мэв}$ .

101. Построить форму импульса на выходе фотоэлектронного умножителя с коэффициентом усиления  $M=10^6$ . В качестве сцинтиллятора используется кристалл антрацена. Облучение производится электронами  $\beta$ -распада  $\text{Sr}^{90}$ . Квантовая эффективность фотокатода умножителя  $\eta_k=10\%$ . Емкость анода фотоумножителя по отношению к земле во включенном состоянии  $C=8 \text{ нф}$ . Сопротивление утечки  $R=10^4 \text{ ом}$ . Коэффициент собирания света принять равным 100%.

102. Сравнить величину импульса в кристалле антрацена при регистрации  $\alpha$ -частиц с энергией 4  $\text{Мэв}$  и электрона с энергией 200  $\text{кэв}$ .

103. При регистрации нейтронов сцинтилляционным счетчиком используется реакция  $\text{Li}^7(n, \alpha)\text{H}^3$ , при которой выделяется в виде кинетической энергии заряженных частиц 4,78  $\text{Мэв}$ . Энергия  $\gamma$ -квантов, сопровождающих нейтронное излучение, обычно не превышает 2  $\text{Мэв}$ . Определить величину порога амплитудного дискриминатора на выходе фотоэлектронного умножителя с коэффициентом усиления  $M=10^5$ , необходимую для того, чтобы отсеять импульсы от  $\gamma$ -квантов фона. Квантовая эффективность фотокатода умножителя  $\eta_k=100\%$ ; коэффициент собирания света 90%; емкость собирающего электрода по отношению к земле во включенном состоянии  $C=10 \text{ нф}$ .

104. Для регистрации потока тепловых нейтронов используется жидкий сцинтиллятор, в котором растворен метилборат, содержащий 20  $\text{мг}$  естественного бора. Оценить время, в течение которого эффективность регистрации умень-

шится на 10%, если поток нейтронов составляет  $10^{12}$  част/(см<sup>2</sup>·сек).

**105.** Сцинтилляционный гамма-спектрометр с кристаллом NaJ(Tl) регистрирует  $\gamma$ -кванты Bi<sup>213</sup>. Оценить минимальное разрешение по энергии в этом спектрометре, если коэффициент собирания света 90%, а квантовая эффективность фотокатода умножителя  $\eta_k = 10\%$ .

**106.** Сравнить величины импульсов, возникающих при рассеивании быстрых нейтронов на ядрах углерода и водорода в жидком сцинтилляторе. Значение конверсионной эффективности сцинтиллятора при регистрации ядер углерода в 8 раз меньше, чем при регистрации протонов.

**107.** В сцинтилляционном счетчике измерены амплитуды импульсов от монохроматического источника  $\gamma$ -квантов. Оказалось, что амплитуды распределены следующим образом:

Амплитуда, в	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
Число импульсов	1	1	2	10	23	31	42	54	46	55	35	28	16	10	2	2

Вычислить среднее значение и стандартное отклонение амплитуды импульсов. Построить распределение, указать статистические ошибки отдельных измерений.

### Счетчики черенковского излучения

Черенковские счетчики используются для регистрации быстрых заряженных частиц. Излучение Черенкова возникает в тех случаях, когда скорость заряженной частицы  $v$  в некоторой среде превышает скорость распространения света в этой среде  $\frac{c}{n}$  ( $v > \frac{c}{n}$ ). Направление распространения черенковского излучения задается углом  $\theta$ , определяемым из соотношения

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta},$$

где  $n$  — показатель преломления среды,  $\beta = \frac{v}{c}$ . Интенсивность черенковского излучения выражается числом фотонов  $I$  в интервале частот  $\Delta\nu$ , возникающих при прохождении частицей в радиаторе пути в 1 см:

$$I = \frac{4\pi^2 e^2}{hc^2} \Delta\nu \left( 1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right) = \frac{2\pi\Delta\nu}{137c} \sin^2 \theta.$$

В области видимого света интенсивность черенковского излучения составляет примерно  $I = 450 \sin^2 \theta$  фотонов. Длитель-

ность импульса черенковского излучения определяется разностью времен  $t_2$  и  $t_1$ , которые отвечают моменту прихода в точку, отстоящую на расстоянии  $\rho$  от траектории частицы, фиолетовой и красной границы спектра:

$$\tau = t_2 - t_1 = \frac{\rho}{\beta c} [\operatorname{tg}(\theta + \Delta\theta) - \operatorname{tg} \theta].$$

При не слишком больших значениях дисперсии  $\frac{\Delta n}{n}$  это выражение можно упростить:

$$\tau \approx \frac{\rho}{\beta c} \cdot \frac{\Delta\theta}{\cos^2 \theta}.$$

Если известен угол черенковского излучения  $\theta$  и показатель преломления среды  $n$ , можно рассчитать кинетическую энергию регистрируемых частиц:

$$\tau = Mc^2 \left( \frac{n \cos \theta}{\sqrt{n^2 \cos^2 \theta - 1}} - 1 \right).$$

— • —

**108.** Оценить время разрешения в счетчике черенковского излучения, если длина излучателя 10 см.

**109.** Оценить скорость протонов, регистрируемых черенковским счетчиком, если угол  $\theta$ , под которым излучают эти протоны в дистиллированной воде, составляет  $25^\circ 30'$ . Какова должна быть длина излучателя для того, чтобы неопределенность в величине скорости, связанная с потерей энергии в самом излучателе, не превышала 0,3%?

**110.** Какой энергией должна обладать  $\alpha$ -частица, чтобы создать черенковское излучение в воде?

**111.** Электрон, проходя через воду, создает черенковское излучение, которое распространяется под углом  $40^\circ$  к направлению его движения. Определить энергию электрона и вычислить число фотонов, создаваемых на 1 см его пути.

**112.** Оценить величину импульса в счетчике Черенкова, возникающую в результате прохождения релятивистского электрона с энергией 10 Мэв через радиатор с дистиллированной водой толщиной 3 см. Коэффициент усиления фотоэлектронного умножителя  $M=10^5$ . Квантовая эффективность фотокатода  $\eta_k=10\%$ . Емкость анода фотоумножителя по отношению к земле во включенном состоянии  $C=8$  пф. Коэффициент собирания света считать равным 90%.

**113.** Определить световой выход от  $\pi$ -мезона с энергией 80 Мэв в дистиллированной воде при длине излучателя 3 см в интервале длин волн, соответствующих спектральной чувствительности сурьмяно-цезиевого катода (350—550 мкм).

**114.** Каков выход фотоэлектронов от черенковского излучения, создаваемого  $\pi$ -мезонами с энергией 100 Мэв на 1 см пути в плексигласе, если 15% света теряется при отражении

на различных поверхностях, а остальная часть попадает на катод фотоумножителя, квантовая эффективность которого 15%?

### Приборы для регистрации следов заряженных частиц

В этом разделе представлены задачи на искровую камеру и ядерные фотографические эмульсии. В искровой камере электроны, образованные заряженной частицей, ускоряются сильным электрическим импульсным полем, и между электродами возникает искра или группа искр. Искровая камера представляет собой управляемый прибор. Обычно она помещается между группой счетчиков, импульс с которых включает высоковольтный генератор. Генератор включается только после прохождения заряженной частицы через рабочий объем. Время запаздывания высоковольтного импульса должно быть меньше времени рассасывания электронов  $t_p$  под влиянием очищающего поля.  $t_p = \frac{d}{u}$ , где  $d$  — расстояние между электродами,  $u$  — скорость дрейфа электронов. Количество электронов, оставшихся в рабочем объеме к моменту подачи высоковольтного импульса, можно оценить из формулы:  $n = n_0 \left(1 - \frac{uT_3}{d}\right)$ , где  $n_0$  — число электронов, образованное частицей;  $T_3$  — время запаздывания высоковольтного импульса.

В фотографических эмульсиях микрокристаллы галогенида серебра под действием света или ионизирующего излучения приобретают способность к проявлению. Облучение светом или ионизирующими частицами приводит к образованию в эмульсионном зерне центра скрытого изображения. Для того чтобы облученное зерно сумело проявиться за выбранное время проявления, необходимо, чтобы количество серебра в центре скрытого изображения было не меньше порога чувствительности эмульсии. Порог чувствительности может быть рассчитан как

$$\omega = an_{\min},$$

где  $n_{\min}$  — минимальное количество серебра в центре скрытого изображения, обеспечивающее проявление зерна;  $a$  — количество энергии, затрачиваемое заряженной частицей на образование одного атома серебра в микрокристалле галогенида серебра. Если частица теряет в эмульсионном зерне энергию  $\Delta\mathcal{E}$ , то при заданном соотношении  $K = \frac{\Delta\mathcal{E}}{\omega}$ , вероятность проявления зерна должна определяться вероятностью того, что в зерне окажется не более  $K$  центров чувствительности плюс вероятность всех возможных комбинаций, при которых число центров в зерне больше  $K$ , но благодаря стати-



стическим флуктуациям число атомов серебра скрытого изображения хотя бы в одном из центров составит величину  $n_{\text{мин}}$  или большую:

$$W = W(\bar{m}, 1) + W(\bar{m}, 2) + \dots + W(\bar{m}, K) + \\ + W(\bar{m}, K+1) W(K+1, n \geq n_{\text{мин}}) + \\ + W(\bar{m}, K+2) W(K+2, n \geq n_{\text{мин}}) + \dots$$

Здесь  $\bar{m}$  — среднее число центров чувствительности, приходящееся на одно зерно.



**115.** Определить эффективность регистрации космических частиц искровой камерой. Частицы проходят в камере путь 5 см. Камера наполнена неоном до давления  $p=500$  мм рт. ст. Рассмотреть случай прохождения искры по треку.

**116.** Определить, сколько электронов останется в искровой камере к моменту подачи высоковольтного импульса, если время запаздывания высоковольтного импульса равно 1 мксек. Камера регистрирует космические частицы. Напряженность очищающего поля  $E=200$  в/см. Расстояние  $d$  между электродами камеры равно 10 см. Камера наполнена неоном до давления  $p=400$  мм рт. ст.

**117.** Искровая камера регистрирует космические частицы. Камера наполнена смесью из неона 99% и аргона 1% до давления  $p=600$  мм рт. ст. Расстояние  $d$  между электродами камеры равно 8 см. Напряженность очищающего поля составляет 500 в/см. Камера управляется счетчиками Гейгера. Оценить допустимое время задержки подачи высоковольтного импульса.

**118.** Искровая камера управляется счетчиками Гейгера, включенными в схему совпадений, импульсы от которой запускают высоковольтный генератор, подающий напряжение на электроды камеры. В течение 10 мин высоковольтный генератор сработал 200 раз. Число искр от релятивистских частиц, образовавшееся за это же время в камере, 180. Определить эффективность регистрации искровой камерой релятивистских частиц и ее абсолютную погрешность.

**119.** Оценить вероятность проявления зерна в ядерной фотографической эмульсии, если среднее число центров чувствительности, приходящееся на одно зерно, составляет 2, а отношение количества энергии, потерянной частицей в зерне,  $\Delta\mathcal{E}$  к порогу чувствительности эмульсии  $\omega$ , равно  $K = \frac{\Delta\mathcal{E}}{\omega} = 3$ .

**120.** Построить зависимость вероятности проявления эмульсионного зерна от значения среднего числа центров чувствительности  $\bar{m}$ , приходящегося на одно зерно. Отношение количества энергии, потерянной частицей в зерне  $\Delta\mathcal{E}$ ,

к порогу чувствительности эмульсии  $\omega$  равно  $K = \frac{\Delta\%}{\omega} = 2$ .

Для  $\bar{m}$  взять значения: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3.

**121.** Построить зависимость наиболее выгодного среднего числа центров чувствительности, приходящегося на одно зерно, от отношения количества энергии, потерянной частицей в эмульсионном зерне, к порогу чувствительности эмульсии.  $K = \frac{\Delta\%}{\omega}$  изменяется от 1 до 10.

**122.** Оценить вероятность проявления зерна в ядерной фотографической эмульсии, предназначенной для регистрации релятивистских частиц. Порог чувствительности эмульсии составляет 200 эв на зерно. Среднее число центров чувствительности, приходящееся на один микрокристалл галогенида серебра,  $\bar{m} = 2$ . Отношение количества энергии, потерянной частицей в зерне, к порогу чувствительности эмульсии равно  $K = \frac{\Delta\%}{\omega} = 1,2$ .

**123.** При определении ионизирующей способности частицы была измерена плотность зерен на ее треке в фотографической эмульсии. Длина трека составляла 1 мм. Числа зерен на отрезках длиной 100 мк оказались 39, 40, 40, 38, 43, 37, 39, 38, 36, 40. Определить относительную удельную ионизацию для этой частицы, если известно, что число зерен, создаваемое частицей с минимальной ионизацией в эмульсии данного типа составляет 33 зерна на 100 мк.

**124.** В ядерной фотографической эмульсии необходимо измерить ионизирующую способность частицы. Известно, что средняя плотность зерен, т. е. число зерен на отрезках длиной 100 мк, равно 40, а средняя длина трека составляет 600 мк. Какое количество треков необходимо обработать, чтобы относительная ошибка измерения была не более 2%? Каким количеством треков можно ограничиться, если допустимая ошибка 5%?

---

## ОТВЕТЫ И УКАЗАНИЯ

---

1. Расстояние между электродами выбирается таким образом, чтобы пробег  $\alpha$ -частицы полностью укладывался в рабочем объеме ионизационной камеры.  $d \geq 2,1$  см.

2.  $\sim 0,6$  см.

3. Не более 7,75 мк.

4. Не менее 1,2 атм.

5.  $9,66 \frac{\text{Мэв}}{\text{г/см}^2}$ ; 0,47 Мэв.

6.  $5,7 \cdot 10^4$  л/см; 95 л/см.

7.  $I_{\text{и}} = 10^{-9}$  а; давление не менее 1,5 атм.

8. 0,2 мр.

9. При построении следует учесть зависимость пробега этих частиц от давления.

10.  $7,1 \cdot 10^{-15}$  а.

11.  $0,11 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{ч}}$ .

12.  $1,76 \cdot 10^{-16}$  а.

13.  $1,7 \cdot 10^{-11}$  а.

14.  $d \approx 16$  мк.

15.  $I \approx 4,6 \cdot 10^{-4}$  а.

16.  $\sim 7,7 \cdot 10^5$  см/сек.

17. 183 см/сек.

18.  $T_+ = 9,8 \cdot 10^{-3}$  сек;  $T_- = 7,1 \cdot 10^{-3}$  сек.

19.  $T_e = 8,4 \cdot 10^{-6}$  сек;  $T_+ = 5,4 \cdot 10^{-3}$  сек.

20. Не менее 100 Мом.

21. Не более 100 ком.

22. Следует сравнить амплитуду импульса от релятивистской частицы с амплитудой собственных шумов усилителя.

23. 1,2 мв.

24. Найти зависимость амплитуды импульса от времени; рассчитать максимальные значения для электронной и ионной составляющих; построить несколько точек на спадающей части кривой. При расчете электронной составляющей можно принять, что  $RC \gg T_e$ .

$$\Delta V_{e \text{ макс}} = 4,65 \cdot 10^{-4} \text{ в}; \quad \Delta V_{+ \text{ макс}} = 1,84 \cdot 10^{-4} \text{ в}.$$

25. Импульс определяется только электронной составляющей.

$$\Delta V_{e \text{ макс}} = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ в.}$$

26. Обратить внимание на то, что пробег  $\alpha$ -частицы больше расстояния между электродами.

$$\Delta V_{e \text{ макс}} = 1,05 \cdot 10^{-4} \text{ в.}$$

27. Так как пробег  $\alpha$ -частицы меньше расстояния между электродами, то в случае «а» электронная составляющая должна состоять из двух слагаемых

$$\Delta V_e t_1 + \Delta V_e t_2,$$

где  $t_1$  — время прихода первого электрона на положительный электрод,  $t_2$  — разность между полным временем собирания электронов и  $t_1$ . В случае «б» ионная составляющая должна состоять из двух слагаемых

$$\Delta V_+ t_1 + \Delta V_+ t_2,$$

где  $t_1$  — время прихода первого иона на отрицательный электрод,  $t_2$  — разность между полным временем собирания ионов и  $t_1$ .

$$\text{а) } \Delta V_{e \text{ макс}} = 10^{-3} \text{ в; } \Delta V_{+ \text{ макс}} = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ в.}$$

$$\text{б) } \Delta V_{e \text{ макс}} = 4,28 \cdot 10^{-4} \text{ в; } \Delta V_{+ \text{ макс}} = 6,88 \cdot 10^{-4} \text{ в.}$$

28. Амплитуда импульса определяется только электронной составляющей. Так как пробег частицы меньше расстояния между электродами, то в случае «а» импульс будет состоять из двух составляющих

$$\Delta V_e t_1 + \Delta V_e t_2,$$

где  $t_1$  — время прихода первого электрона на собирающий электрод,  $t_2$  — разность между полным временем собирания электронов и  $t_1$ .

$$\text{а) } \Delta V_{e \text{ макс}} = 2,32 \cdot 10^{-4} \text{ в; } \text{б) } \Delta V_{e \text{ макс}} = 0,43 \cdot 10^{-4} \text{ в.}$$

29. Разброс импульсов по амплитудам определяется отношением разности между максимальным и минимальным значениями величины импульса к среднему значению.

$$\frac{\Delta V_{\text{макс}} - \Delta V_{\text{мин}}}{\Delta V_{\text{ср}}} = 1,4\%.$$

30. 260 мк.

31. 6 мк.

32. В камере, наполненной аргоном,  $\Delta V_{\text{макс}} = 4,36 \cdot 10^{-4} \text{ в}$ ; в камере, наполненной  $\text{Ag} + 5\% \text{ CO}_2$ ,  $\Delta V_{\text{макс}} = 8,4 \cdot 10^{-4} \text{ в}$ .

Для объяснения результатов следует сравнить произведение  $RC$  с временем собирания электронов.

33. В камере, наполненной аргоном,  $\Delta V_{\text{макс}} = 8,35 \cdot 10^{-6}$  в; в камере, наполненной  $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ,  $\Delta V_{\text{макс}} = 5,15 \cdot 10^{-4}$  в.

Для объяснения результатов следует сравнить произведение  $RC$  с временем собирания электронов.

34. Для того чтобы построить дифференциальное распределение импульсов по амплитудам  $f(\Delta V)$ , следует найти зависимость числа импульсов с данной амплитудой [в пределах от  $\Delta V$  до  $\Delta V + d(\Delta V)$ ] от амплитуды, выраженной в единицах  $q_0/C$ . Число импульсов с данной амплитудой выражается через интенсивность источника  $N_0$  и телесный угол  $d\omega$ , определяемый линейным углом  $\theta$  между направлением полета  $\alpha$ -частицы и силовыми линиями поля. При построении интегрального распределения импульсов по амплитудам  $F(\Delta V)$  необходимо найти зависимость числа импульсов с амплитудой больше данной от амплитуды. Это можно получить, интегрируя  $f(\Delta V)$  в пределах от  $\Delta V$  до  $\Delta V_{\text{макс}} = q/C$ .

а)  $f(\Delta V) = \frac{N_0}{q_0/C}$  в пределах от  $\theta = 0$  до  $\theta = 1/2 \pi$  (от  $1/2 q_0/C$  до  $q_0/C$ ).

$$F(\Delta V) = N_0 \left( 1 - \frac{\Delta V}{q/C} \right).$$

б)  $\Delta f = \frac{N_0}{q_0/C}$  в пределах от  $\theta = 0$  до  $\theta = \frac{\pi}{2}$  (т. е. от  $\Delta V = 0$  до  $\Delta V = q_0/2C$ ).

$$F(\Delta V) = N_0 \left( \frac{1}{2} - \frac{\Delta V}{q_0/C} \right).$$

35. Найти зависимость числа импульсов в данном канале от номера канала. Максимальная амплитуда импульса  $\Delta V_{\text{макс}} = 92$  в; минимальная амплитуда импульса  $\Delta V_{\text{мин}} = 46$  в. В этих пределах число импульсов в каждом канале можно считать одинаковым:  $n = 196$  имп/канал.

36. Для определения скорости счета следует найти количество  $\alpha$ -частиц  $dN$ , вылетающих из бесконечно тонкого слоя  $dx$ , находящегося на расстоянии  $x$  от поверхности источника (причем  $x < R_\alpha$ ), в телесном угле  $\omega$ , определяющем частицы, попавшие в рабочий объем камеры. Затем проинтегрировать это выражение по всем  $x$  от 0 до  $R_\alpha$ .

а) В случае «бесконечно толстого» слоя

$$N = \frac{Q}{4} \cdot \frac{R_\alpha}{l}.$$

б) В случае «бесконечно тонкого» слоя

$$N = \frac{Q}{2} \left( 1 - \frac{l}{2R_\alpha} \right).$$

Здесь  $N$  — скорость счета;  $Q = neS$  — интенсивность источника;  $R_\alpha$  — пробег  $\alpha$ -частицы.

37. Необходимо учесть, что эквивалентная емкость  $C$  заряжается только в течение того времени, пока электроны двигаются в рабочем объеме камеры. Поэтому форму импульса удобно строить, разбивая временную ось на следующие интервалы:

а)  $t'$  — момент появления электронов в рабочем объеме,  $t''$  — момент прихода электронов на собирающий электрод.

$$\Delta V(t') = 0; \Delta V(t'') = \frac{q_0}{C}.$$

б)  $t_1$  — момент прихода первого электрона на собирающий электрод;

$t_2$  — момент прихода последнего электрона в рабочий объем;

$t_3$  — момент прихода последнего электрона на собирающий электрод.

$$\Delta V(t_1) = \frac{q_0}{4C}; \Delta V(t_2) = \frac{q_0}{2C}; \Delta V(t_3) = \frac{q_0}{4C}.$$

38. Разрешение по энергии определяется как статистическими флуктуациями в числе пар ионов, созданных  $\alpha$ -частицей, так и потерями энергии в самом источнике.

$$\frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}} \cong 6\%.$$

39.  $F \approx 1,6 \cdot 10^3$  нейтрон/(см<sup>2</sup>·сек).

40. Среднее число распадов за 1 час составляет 4. На пяти метрах ленты можно записать 400 импульсов. Эффект распределен по закону Пуассона.

41. Пропуски 12%; скорость счета  $n = 1250$  имп/сек.

42.  $3,33 \pm 0,03$ . При ошибке в 2% время измерения 15 мин; при ошибке в 5% время измерения  $\sim 4$  мин.

43. При определении количества ленты нужно найти число импульсов, которое необходимо записать на этой ленте, чтобы обеспечить заданную точность. Количество ленты 5,55 м. Скорость ленты не менее 26 см/ч.

$$44. \frac{\Delta V_1}{\Delta V_2} = 1,6 \cdot 10^5.$$

45. 330.

46.  $\sim 30$ .

47. а) 9%; б) 64%.

48.  $\eta = 2,3\%$ .

49. 0,6%. В естественной смеси изотопов бора изотоп  $B^{10}$  составляет 18,8%. Чтобы повысить эффективность, следует довести концентрацию изотопа  $B^{10}$  до 75%.

50. 20 *имп/сек*; 10 раз.

51.  $m = \exp\left(AV e^{-\frac{B}{V}}\right)$ , где  $A$  и  $B$  — постоянные.

52. Для объяснения этого явления следует рассмотреть вторичные эффекты в этих газах.

53. Так как пробег ядра  $\text{Li}_3^7$  очень мал, то в основном регистрируются только  $\alpha$ -частицы, летящие в угле  $2\pi$ .  $\eta = 0,3\%$ .

54. Задачу предлагается решать, используя принцип наименьших квадратов.  $\lambda = 0,0189$ ;  $N_0 = 52500$ .

55.  $\sim 73$  в.

56.  $\tau = (116 \pm 30)$  *мксек*.

57.  $\sim 10^9$ .

58.  $\sim 10^{10}$ .

59.  $\sim 200$  *мккюри*.

60.  $\sim 0,5\%$ .

61.  $3\%$ .

62. Для счетчика, наполненного аргоном,  $\eta = 99\%$ ; для счетчика, наполненного водородом,  $\eta = 74\%$ . При решении этой задачи необходимо определить средний путь космической частицы в счетчике.

63.  $\eta = 94,8\% \pm 1\%$ .

64. Пропуски возникают в тех случаях, когда частица не считается по крайней мере одним из трех счетчиков, включенных в схему совпадений. Пропуски  $\sim 10\%$ .

65. Доля  $\gamma$ -квантов, поглощенных в стенках счетчика,  $\sim 0,01$ , поглощенных в газе,  $\sim 0,0001$ .

66. Не менее  $3,5$  *Мэв*.

67.  $0,35$ .

68. а)  $n = 0,5$  *имп/сек*;  $T = 37$  *мин*.

б)  $n = 25$  *имп/сек*;  $T = 44$  *сек*.

69.  $\sim 2 \cdot 10^4$  *имп*.

70. Длительность гасящего импульса определяется временем собирания положительных ионов. Не менее  $200$  *мксек*.

71. От источника  $2250$  *имп*, фон  $250$  *имп*.

72.  $\tau = 63$  *мксек*.

73.  $540$  *мккюри*.

74.  $2,48$  *мв*.

75.  $3$  *мв*.

76. Время нарастания фронта импульса определяется временем собирания носителей зарядов, образованных заряженной частицей в чувствительном слое.  $\sim 2 \cdot 10^{-8}$  *сек*.

77.  $5,3 \cdot 10^{-9}$  *сек*.

78.  $70$  *мк*.

79. Для германия  $q = 220$  *ом·см*; для кремния  $q = 6 \times 10^5$  *ом·см*.

80. Время жизни определяется временем дрейфа носителей зарядов до чувствительной области. Время дрейфа дырок  $T_+ = 190$  *мксек*; время дрейфа электронов  $T_e = 83$  *мксек*.

81. Сопротивление утечки зависит от времени собирания носителей зарядов, которое определяется временем дрейфа носителей.  $R \sim 10^5 \text{ ом}$ .

82. В 1,4 раза.

83.  $1,6 \cdot 10^5$ .

84. 4,5.

85.  $d=250 \text{ мк}$ ;  $q=5 \cdot 10^3 \text{ ом} \cdot \text{см}$ .

86. 1) 15; 2) 136; 3) 13,6. Таким образом, наилучшее отношение сигнала к шуму во втором варианте, наихудшее — в третьем. При расчете необходимо учитывать изменение величины сопротивления кристалла и изменение емкости.

87.  $\eta \approx 1,2\%$ .

88. Разрешение по энергии в полупроводниковом детекторе примерно в 10 раз лучше.

89. 2,8 эв; 3,2 эв.

90.  $2,6 \cdot 10^4$ .

91. 10%.

92.  $K=2,2 \cdot 10^3$ .

93.  $\sigma = 2,9$ ;  $\frac{\Delta K}{K} = 1,2\%$ .

94. Темновой ток, в основном, определяется термоэмиссией, поэтому зависимость темнового тока от температуры можно определить, применяя формулу Ричардсона. а) в 10 раз; б) в 1000 раз.

95.  $\eta=24,4\%$ ;  $d=15,3 \text{ см}$ .

96.  $\Delta V=2,4 \text{ в}$ .

97. а)  $\eta=73\%$ ; б)  $\eta=99\%$ .

98. 24 в.

99. 32 в.

100.  $\sim 0,6\%$ .

101. Максимальное значение амплитуды импульса  $\Delta V=10 \text{ в}$  при  $t=6 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$ .

102.  $\frac{\Delta V_\alpha}{\Delta V_\beta} = 1,7$ .

103. 10 в.

104. Около 1 года.

105. 2%.

106.  $\frac{\Delta V_H}{\Delta V_C} = 46$ .

107.  $40 \pm 3$ .

108. Время разрешения ограничено временем разрешения фотоэлектронного умножителя.

109. Скорость протонов  $2,5 \cdot 10^{10} \text{ см/сек}$ ; длина излучателя не более 5 см.

110. 1960 Мэв.

111. Энергия электрона 2 Мэв; число фотонов, создаваемое им на 1 см пути в излучателе, 200.



112.  $\Delta V = 0,1$  в.

113.  $90^\circ$ .

114. 20.

115. 100%.

116. Порядка 60.

117. Время подачи высоковольтного импульса должно быть меньше времени дрейфа электронов под действием очищающего поля.  $T_{\text{дв}} = 6$  мксек.

118.  $\eta = 90\% \pm 2,2\%$ .

119. Будут проявлены все зерна, имеющие 1, 2, 3 центра чувствительности.  $W = 0,73$ .

120. Наибольшее значение вероятности проявления 0,59 при  $\bar{m} = 1,5$ .

121. Соотношение между  $\bar{m} = f(K)$ .

122. 0,285.

123.  $1,18 \pm 0,06$ .

124. а) 10; б) 2.

# ПРИЛОЖЕНИЕ I

## ТАБЛИЦЫ

Таблица 1

### Элементы и изотопы

Элемент	Символ	Атомный номер	Атомный вес	Элемент	Символ	Атомный номер	Атомный вес
Азот	N	7	14,008	Иридий	Ir	77	192,2
Актиний	Ac	89	227	Иттербий	Yb	70	173,04
Алюминий	Al	13	26,98	Иттрий	Y	39	88,92
Америций	Am	95	243	Иод	I	53	126,91
Аргон	Ar	18	39,944	Кадмий	Cd	48	112,41
Астатин	At	85	210	Калий	K	19	39,10
Барий	Ba	56	137,36	Калифорний	Cf	98	246
Бериллий	Be	4	9,013	Кальций	Ca	20	40,08
Берклий	Bk	97	245	Кислород	O	8	16,00
Бор	B	5	10,82	Кобальт	Co	27	58,94
Бром	Br	35	79,916	Кремний	Si	14	28,09
Ванадий	V	23	50,95	Криптон	Kr	36	83,80
Висмут	Bi	83	209,00	Ксенон	Xe	54	131,3
Водород	H	1	1,008	Кюрий	Cm	96	243
Вольфрам	W	74	183,92	Лантан	La	57	138,92
Гадолиний	Gd	64	156,9	Литий	Li	3	6,940
Галий	Ga	31	69,72	Лютеций	Lu	71	174,99
Гафний	Hf	72	178,6	Магний	Mg	12	24,32
Гелий	He	2	4,003	Марганец	Mn	25	54,94
Германий	Ge	32	72,6	Медь	Cu	29	63,54
Гольмий	Ho	67	164,94	Менделевий	Md	101	
Диспрозий	Dy	66	162,46	Молибден	Mo	42	92,95
Европий	Eu	63	152,0	Мышьяк	As	33	74,91
Железо	Fe	26	55,85	Натрий	Na	11	22,991
Золото	Au	79	197	Неодим	Nd	60	144,27
Индий	In	49	114,76	Неон	Ne	10	20,183

Элемент	Символ	Атомный номер	Атомный вес	Элемент	Символ	Атомный номер	Атомный вес
Нептуний	Np	93	237	Стронций	Sr	38	87,63
Никель	Ni	28	58,69	Сурьма	Sb	51	121,76
Ниобий	Nb	41	92,91	Таллий	Tl	81	204,39
Олово	Sn	50	118,70	Тантал	Ta	73,0	180,95
Осмий	Os	76	190,2	Теллур	Te	52	127,61
Палладий	Pd	46	106,7	Тербий	Tb	65	158,93
Платина	Pt	78	195,23	Технеций	Tc	43	99
Плутоний	Pu	94	242	Титан	Ti	22	47,90
Полоний	Po	84	210	Торий	Th	90	232,05
Празеодим	Pr	59	140,92	Тулий	Tu	69	168,94
Прометий	Pm	61	145	Углерод	C	6	12,011
Протактиний	Pa	91	231	Уран	U	92	238,07
Радий	Ra	88	226,05	Фермий	Fm	100	248
Радон	Rn	86	222	Фосфор	P	15	30,975
Рений	Re	75	186,31	Франций	Fr	87	223
Родий	Rh	45	102,91	Фтор	F	9	19,00
Ртуть	Hg	80	200,61	Хлор	Cl	17	35,457
Рубидий	Rb	37	85,48	Хром	Cr	24	52,01
Рутений	Ru	44	101,1	Цезий	Cs	55	132,91
Самарий	Sm	62	150,43	Церий	Ce	58	140,13
Свинец	Pb	82	207,21	Цинк	Zn	30	65,38
Селен	Se	34	78,96	Цирконий	Zr	40	91,22
Сера	S	16	32,066	Эйнштейний	Es	99	247
Серебро	Ag	47	107,880	Эрбий	Er	68	167,2
Скандий	Sc	21	44,96				

Универсальные физические константы и наиболее часто встречающиеся физические величины

Наименование	Значение константы в единицах системы	
	С Г С	С И
Абсолютный нуль температуры	$0^{\circ}\text{K} = -273,15^{\circ}\text{C}$	
Физическая атмосфера, соответствующая нормальному атмосферному давлению	$1 \text{ атм}$ или $760 \text{ мм рт. ст.} = (1,01325 \pm 0,00004) \cdot 10^6 \text{ дин. см}^{-2}$	$1 \text{ атм} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ н. м}^{-2}$
Скорость света в вакууме $c$	$(2,99793 \pm 0,00001) \cdot 10^{10} \text{ см. сек}^{-1}$	$(2,99793 \pm 0,00001) \cdot 10^8 \text{ м. сек}^{-1}$
Молярный объем идеального газа при нормальных условиях	$(22,427 \pm 0,0006) \cdot 10^3 \text{ см}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$ $(22,414 \text{ л. моль}^{-1})$	$(22,4207 \pm 0,006) \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,3169 \pm 0,0004 \cdot 10^7 \text{ эрг. моль}^{-1} \times$ $\times \text{град}^{-1}$	$8316,96 \pm 0,311 \text{ дж. кмоль}^{-1}$
Число Авогадро	$(6,02485 \pm 0,00016) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$	$(6,02486 \pm 0,00016) \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$
Число Лошмидта (число молекул идеального газа в $1 \text{ см}^3$ при $p = 760 \text{ мм рт. ст.}$ )	$L_0 = (2,6872 \pm 0,0001) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$	$L_0 = (2,68719 \pm 0,00019) \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$
Постоянная Планка	$h = (6,6252 \pm 0,0002) \cdot 10^{-27} \text{ эрг. сек}$ $\hbar = h/2\pi = 1,0544 \cdot 10^{-27} \text{ эрг. сек}$	$h = (6,6252 \pm 0,0003) \cdot 10^{-34} \text{ дж. сек}$ $\hbar = h/2\pi = 1,0544 \cdot 10^{-34} \text{ дж. сек}$
Заряд электрона	$e = 1,602 \cdot 10^{-20} \text{ ед. СГСМ}$ $4,803 \cdot 10^{-10} \text{ ед. СГСЭ}$	$e = (1,6020 \pm 0,00003) \cdot 10^{-19} \text{ К}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,1083 \cdot 10^{-28} \text{ г}$	$m_e = (9,1083 \pm 0,00003) \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6724 \cdot 10^{-24} \text{ г}$	$m_p = (1,67239 \pm 0,00004) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Наименование	Значение константы в единицах системы	
	С Г С	С И
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,6747 \cdot 10^{-24} \text{ з}$	$m_n = (1,67470 \pm 0,00004) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя $\alpha$ -частицы	$6,444 \cdot 10^{-24} \text{ з}$	$6,444 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя $\mu$ -мезона	$0,2 \cdot 10^{-24} \text{ з}$	$0,2 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Электрическая постоянная $\varepsilon$	1 (СГСЭ)	$\varepsilon = 1/4\pi \cdot 9 \cdot 10^{-9} \text{ ф} \cdot \text{м}^{-1} =$ $= 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ ф} \cdot \text{м}^{-1}$
Относительные атомные массы (по физической шкале):		
электрона		$A_e = (5,48763 \pm 0,00006) \cdot 10^{-4}$
протона		$A_p = (1,007593 \pm 0,000003)$
нейтрона		$A_n = (1,008982 \pm 0,000003)$
водорода		$A_H = 1,008142 \pm 0,000003$
дейтерия		$A_D = 2,014735 \pm 0,000006$
Соотношение масс:		
протона и электрона		1836
водорода и протона		1,00054
$\pi$ -мезона и электрона		273
$\mu$ -мезона и электрона		207

Взаимосвязь энергии с массой

Наименование	Коэффициент перехода	
	в системе СГС, внесистемные	в системе СИ
Атомная единица массы	$1 \text{ а. е. м.} = (931,141 \pm 0,010) \text{ Мэв} =$ $= 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г}$ $E m = (5,6100 \pm 0,001) \cdot 10^{26} \text{ Мэв} \cdot \text{г}^{-1}$	$1,48 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ $8,99 \cdot 10^{16} \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$
Электронная единица массы	$1 \text{ э. е. м.} = (0,510976 \pm 0,000007) \text{ Мэв}$	$8,16 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}$
Протонная единица массы	$1 \text{ п. е. м.} = (938,211 \pm 0,010) \text{ Мэв}$	$1,50 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$
Нейтронная единица массы	$1 \text{ н. е. м.} = (939,505 \pm 0,010) \text{ Мэв}$	$1,51 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$
Масса $\alpha$ -частицы	3737 Мэв	$5,96 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$
Масса $\pi$ -мезона	139,71 Мэв	$223,536 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$
Масса $\mu$ -мезона	112,5 Мэв	$13 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}$

## Некоторые специальные единицы ядерной физики

Барн — единица измерения эффективного поперечного сечения взаимодействия нейтрона с веществом

$$1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$$

Электронвольт — единица энергии

$$1 \text{ эв} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ дж} = \\ = 1,602 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$$

$$1 \text{ кэв} = 10^3 \text{ эв}$$

$$1 \text{ Мэв} = 10^6 \text{ эв}$$

$$1 \text{ эрг} = 6,25 \cdot 10^{11} \text{ эв}$$

Коэффициент перехода от массы к энергии

$$1 \text{ г} = 5,61000 \cdot 10^{26} \text{ Мэв}$$

Кюри — внесистемная единица активности радиоактивного излучения

$$1 \text{ кюри} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп/сек}$$

Рентген — внесистемная единица экспозиционной дозы рентгеновского и  $\gamma$ -излучений

$$1 \text{ р} = 2,083 \cdot 10^9 \text{ пар ионов в } 1 \text{ см}^3 \\ \text{воздуха при нормальных условиях}$$

$$\text{Энергетический эквивалент рентгена: } 1 \text{ р} = 0,114 \text{ эрг} = 7,1 \cdot 10^4$$

$$\text{Мэв поглощенной энергии в } 1 \text{ см}^3 \\ \text{воздуха при нормальных условиях.}$$

Энергия нейтронов со скоростью 2200 м/сек 0,02529 эв.

Коэффициент для приведения к единицам СИ из других систем

1 г = $10^{-3}$ кг	1 см = $1 \cdot 10^{-2}$ м
1 т = $10^3$ кг	1 Å = $1 \cdot 10^{-10}$ м
1 н. е. м. = $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг	1 мкм = $10^{-6}$ м
1 дин = $1 \cdot 10^{-5}$ н	1 атм = 1 кгс/см <sup>2</sup>
1 кгс = 9,80665 н	

1 ед. силы тока СГС =  $1/3 \cdot 10^{-9}$  а.1 ед. количества электричества СГС =  $1/3 \cdot 10^{-9}$  к.1 ед. напряженности электрического поля =  $3 \cdot 10^{-4}$  в/м.1 ед. напряжения СГС =  $3 \cdot 10^2$  в.1 см =  $\frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$  ф.

Таблица 6

Линейные коэффициенты поглощения  $\gamma$ -квантов  $\text{Co}^{60}$  в различных материалах

Материал	Линейный коэффициент поглощения $\mu$ , см <sup>-1</sup>	Материал	Линейный коэффициент поглощения $\mu$ , см <sup>-1</sup>
Углерод	0,088	Серебро	0,53
Магний	0,099	Кадмий	0,438
Алюминий	0,143	Олово	0,362
Железо	0,407	Вольфрам	1,011
Никель	0,448	Золото	1,074
Медь	0,464	Свинец	0,643
Цинк	0,366		



Зависимость коэффициента поглощения  $\gamma$ -квантов от энергии для воздуха

Энергия $\gamma$ -квантов, $Mэв$	Коэффициенты поглощения			
	$\chi, \text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$	$\chi_a, \text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$	$\mu, 10^{-4} \text{см}^{-1}$	$\times \frac{\mu_a}{10^{-4} \text{см}^{-1}}$
0,01	4,55	4,20	54,9	50,7
0,015	1,45	1,18	17,5	14,3
0,02	0,712	0,479	8,59	5,77
0,03	0,335	0,139	4,04	1,67
0,04	0,239	0,0616	2,88	0,742
0,05	0,203	0,0376	2,45	0,453
0,06	0,185	0,0287	2,23	0,346
0,08	0,166	0,0236	2,00	0,284
0,10	0,155	0,0232	1,87	0,279
0,15	0,136	0,0251	1,64	0,302
0,20	0,123	0,0269	1,48	0,324
0,30	0,107	0,0288	1,29	0,347
0,40	0,0953	0,0295	1,15	0,356
0,50	0,0869	0,0296	1,05	0,357
0,60	0,0804	0,0296	0,696	0,356
0,80	0,0706	0,0288	0,851	0,348
1,0	0,0635	0,0279	0,766	0,336
1,5	0,0516	0,0256	0,622	0,309
2,0	0,0443	0,0237	0,543	0,286
3,0	0,0357	0,0211	0,430	0,254
4,0	0,0307	0,0193	0,369	0,233
5,0	0,0275	0,0182	0,331	0,219
6,0	0,0252	0,0174	0,304	0,209
8,0	0,022	0,0162	0,267	0,195
10	0,0204	0,0155	0,246	0,187
15	0,0180	0,0147	0,217	0,177
20	0,0169	0,0145	0,204	0,175
30	0,0163	0,0146	0,196	0,176
40	0,0160	0,0148	0,193	0,179
50	0,0161	0,0151	0,194	0,182
60	0,0162	0,0154	0,195	0,185
80	0,0166	0,0160	0,199	0,192
100	0,0169	0,0164	0,204	0,197

Примечание.  $\chi$  — массовый коэффициент поглощения  $\gamma$ -квантов;  $\chi_a$  — массовый коэффициент поглощения энергии  $\gamma$ -квантов;  $\mu$  — линейный коэффициент поглощения  $\gamma$ -квантов;  $\mu_a$  — линейный коэффициент поглощения энергии  $\gamma$ -квантов.

Энергия  $\gamma$ -квантов, рассеянных под углом  $\theta$  в результате комптоновского взаимодействия

Угол рассеяния, $\theta^\circ$	Энергия падающих $\gamma$ -квантов, Мэв			
	0,5	1,25	3,0	6,0
0	0,500	1,250	3,000	6,00
5	0,498	1,238	2,933	5,738
10	0,4925	1,204	2,749	5,075
15	0,4835	1,152	2,490	4,258
20	0,4715	1,086	2,203	3,481
25	0,4572	1,013	1,920	2,824
30	0,4408	0,936	1,663	2,300
35	0,4234	0,861	1,439	1,893
40	0,4051	0,789	1,249	1,576
45	0,3866	0,722	1,087	1,329
50	0,3683	0,660	0,955	1,134
55	0,3505	0,605	0,843	0,981
60	0,3332	0,556	0,749	0,857
65	0,317	0,511	0,672	0,757
70	0,3016	0,472	0,606	0,674
75	0,2871	0,438	0,551	0,606
80	0,2736	0,408	0,504	0,549
85	0,2615	0,381	0,463	0,501
90	0,2501	0,357	0,428	0,461
100	0,2298	0, 18	0,374	0,397
110	0,2134	0,287	0,332	0,350
120	0,1998	0,263	0,300	0,316
130	0,1893	0,245	0,276	0,289
140	0,1806	0,231	0,258	0,270
150	0,1743	0,220	0,246	0,256
160	0,1699	0,214	0,238	0,248
170	0,1674	0,210	0,233	0,240
180	0,1665	0,208	0,211	0,239

Т а б л и ц а 9

Ионизационные потери протонов —  $\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\mathcal{E}}{dx}$ , Мэв/г·см<sup>-2</sup>

Энергия протонов, Мэв	Вещество			
	Al	Pb	воздух	C
2	110,8	41,14	134,0	140,6
3	83,16	34,62	99,86	104,4
4	67,44	29,85	80,53	83,97
5	57,19	26,36	68,00	70,74
6	49,84	23,65	58,99	61,29
7	44,38	21,54	52,32	54,28
8	40,09	19,81	47,11	48,81
9	36,67	18,40	42,96	44,47
10	33,80	17,18	39,51	40,87
20	19,70	10,73	22,66	23,34
30	14,31	8,050	16,35	16,79
40	11,41	6,548	12,98	13,32
50	9,584	5,581	10,87	11,14
100	5,674	3,424	6,382	6,526
200	3,522	2,189	3,942	4,016
300	2,771	1,747	3,093	3,148
600	2,022	1,305	2,249	2,278
1000	1,754	1,153	1,950	1,960

## Пробеги протонов в воздухе

Энергия, Мэв	Пробег, см	Энергия, Мэв	Пробег, см	Энергия, Мэв	Пробег, см	Энергия, Мэв	Пробег, см	Энергия, Мэв	Пробег, см
0,0	0,00	1,8	5,99	3,6	19,3	6,8	58,1	11,0	135,7
0,1	0,13	1,9	6,55	3,7	20,22	7,0	61,1	11,5	146,8
0,2	0,25	2,0	7,14	3,8	21,17	7,2	64,2	12,0	158,4
0,3	0,40	2,1	7,74	3,9	22,14	7,4	67,4	12,5	170,3
0,4	0,59	2,2	8,37	4,0	23,12	7,6	70,6	13,0	182,7
0,5	0,80	2,3	9,02	4,2	25,15	7,8	73,9	13,5	195,4
0,6	1,05	2,4	9,69	4,4	27,25	8,0	77,3	14,0	208,5
0,7	1,32	2,5	10,38	4,6	29,43	8,2	80,7	14,5	222,0
0,8	1,62	2,6	11,09	4,8	31,68	8,4	84,2	15	235,9
0,9	1,95	2,7	11,82	5,0	34,0	8,6	87,8	17	295,3
1,0	2,30	2,8	12,57	5,2	36,4	8,8	91,4	20	395,5
1,1	2,69	2,9	13,34	5,4	38,9	9,0	95,1	25	591
1,2	3,09	3,0	14,13	5,6	41,4	9,2	98,9	30	821
1,3	3,52	3,1	14,94	5,8	44,0	9,4	102,7	50	2064
1,4	3,97	3,2	15,77	6,0	46,7	9,6	106,6	100	7138
1,5	4,44	3,3	16,63	6,2	49,4	9,8	110,5	200	23 970
1,6	4,93	3,4	17,50	6,4	52,2	10,0	114,6	300	47 480
1,7	5,45	3,5	18,39	6,6	55,1	10,5	124,9		

Зависимость максимального пробега  $\beta$ -частиц ( $R_\beta$ ) от энергии  
в алюминии и в воздухе

Энергия электронов, Мэв	Алюминий		Воздух
	пробег, $\text{мг} \cdot \text{см}^{-2}$	пробег, мм	пробег, см
0,01	0,16	0,0006	0,13
0,02	0,70	0,0026	0,52
0,03	1,5	0,0056	1,12
0,04	2,6	0,0096	1,94
0,05	3,9	0,0144	2,91
0,06	5,4	0,0200	4,03
0,07	7,1	0,0263	5,29
0,08	9,3	0,0344	6,93
0,09	11	0,0407	8,20
0,1	14	0,0500	10,1
0,2	42	0,155	31,3
0,3	76	0,218	56,7
0,4	115	0,426	85,7
0,5	160	0,593	119
0,6	220	0,778	157
0,7	250	0,926	186
0,8	310	1,15	231
0,9	350	1,30	261

Продолжение табл. 11

Энергия электронов, Мэв	Алюминий		Воздух
	пробег, $\text{мг} \cdot \text{см}^{-2}$	пробег, мм	пробег, см
1,0	4,0	1,52	306
1,25	540	2,02	406
1,50	670	2,47	494
1,75	800	3,01	610
2,0	950	3,51	710
2,5	1 220	4,52	910
3,0	1 500	5,50	1100
3,5	1 750	6,48	1300
4,0	2 000	7,46	1500
4,5	2 280	8,44	1700
5,0	2 540	9,42	1900
6,0	3 080	11,4	2300
7,0	3 600	13,3	2700
8,0	4 140	15,3	3100
9,0	4 650	17,3	3500
10	5 200	19,2	3900
12	6 250	23,2	4700
14	7 300	27,10	5400
16	8 400	31,0	6200
18	9 500	35,0	7000
20	10 500	39,0	7800

Примечание. Для моноэнергетических  $\beta$ -частиц с энергиями  $0,8 \div 3$  Мэв максимальный пробег в алюминии можно вычислить по формуле

$$R (\text{г} \cdot \text{см}^{-2}) = 0,542 \mathcal{E}_{\beta} - 0,133.$$

Определение пробега  $\alpha$ -частиц в различных веществах

Вещество	Воздух	Алюминий	Аргон	Медь	Криптон	Ксенон	Золото
Коэффициент, $K$	1,0	1,3	1,5	1,7	1,9	2,2	2,5

Примечание. Для  $\alpha$ -частиц естественной радиоактивности (5—8 Мэв) длину пробега в любом веществе можно оценить, умножая длину пробега в воздухе, выраженную в  $\text{г} \cdot \text{см}^{-2}$ , на коэффициент  $K$ .

Массовые коэффициенты поглощения  $\beta$ -излучения в алюминии  
(в зависимости от энергии излучения некоторых изотопов)

Изотоп	$E_{\beta}$ , Мэв	$\chi$ , см <sup>2</sup> ·г <sup>-1</sup>
<sup>15</sup> P <sup>32</sup>	1,71	5,3
<sup>16</sup> S <sup>35</sup>	0,17	290
<sup>20</sup> Ca <sup>45</sup>	0,25	128
<sup>27</sup> Co <sup>60</sup>	0,31	79
<sup>82</sup> Pb <sup>210</sup>	0,018; 0,057	2034
<sup>83</sup> Bi <sup>210</sup>	1,17	17

Таблица 14

Значение относительной тормозной способности различных веществ  
для  $\alpha$ -частиц с энергией около 6 Мэв

Вещество	Толщина слоя, мг/см <sup>2</sup>
Слюда	1,45
Алюминий	1,52
Серебро	2,71

Примечание. Химическая формула слюды  $KAl_2(OH, F)_2[AlSi_3O_{10}]$ .

Средний атомный вес 19.

Молекулярный вес 436,1.



Пробег  $\alpha$ -частиц в воздухе, см

Таблица 15

Энергия $\varepsilon$ , Мэв	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,000	0,097	0,16	0,210	0,256	0,297	0,336	0,376	0,417	0,459
1	0,502	0,546	0,592	0,639	0,687	0,736	0,785	0,836	0,889	0,944
2	1,001	1,060	1,121	1,183	1,247	1,313	0,381	1,451	1,522	1,595
3	1,67	1,747	1,826	1,906	1,987	2,071	2,156	2,243	2,331	2,421
4	2,512	2,605	2,700	2,797	2,895	2,994	3,095	3,198	3,302	3,406
5	3,514	3,622	3,732	3,844	3,956	4,070	4,184	4,300	4,418	4,537
6	4,658	4,780	4,903	5,028	5,145	5,282	5,412	5,543	5,675	5,808
7	5,943	6,080	6,218	6,357	6,498	6,640	6,783	6,928	7,074	7,222
8	7,730	7,520	7,671	7,824	7,978	8,133	8,290	8,448	8,607	8,768
9	8,930	9,093	9,257	9,423	9,590	9,758	9,928	10,099	10,271	10,445

Примечание. Пробег  $\alpha$ -частиц в других веществах можно рассчитать по приближенной формуле:

$$R_A (\text{мг/см}^2) = 0,56 \cdot R (\text{см}) \cdot A^{1/3},$$

где  $R$ —пробег  $\alpha$ -частицы в воздухе, см;

$R_A$ —пробег  $\alpha$ -частицы в веществе, выраженный в  $\text{мг} \cdot \text{см}^{-2}$ ;

$A$ —атомный вес вещества.

Таблица 16

Средняя энергия  $\omega$  (эв), расходуемая на образование одной пары ионов в различных газах

Частица	Воздух	H <sub>2</sub>	He	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	BF <sub>3</sub>	Ar	Ne
$\alpha$ -Частицы ( $\sim 5,3$ Мэв)	35,0	36,0	40,3	36,0	32,2	35,3	25,8	36,0
$\alpha$ -Частицы ( $\sim 1,2$ Мэв)	37,1		42,4				26,4	37,4
Быстрые электроны	35,0	38,0	32,5	35,8	32,2		27,0	35,8
Протоны с энергией 340 Мэв	33,3	35,3	29,9	33,6	31,5		25,5	33,6

Таблица 17

Среднее значение энергии  $\omega$  (эв), затрачиваемой ионизирующей частью на образование пары электрон — дырка в кристаллических веществах

Вещество	Алмаз	Хлористое серебро	Бромистое серебро	Кремний	Германий
Энергия $\omega$ , эв	10	7,6	5,8	3,5	2,8

Таблица 18

**Значение минимальной удельной ионизации  $\nu_{\text{мин}}$  в некоторых газах  
(экспериментальные данные)**

Газ	Воздух	Водород	Гелий	Аргон
$\nu_{\text{мин}}$	46	6,5	8	53

Примечание.  $\nu_{\text{мин}}$ —среднее значение полного числа пар ионов, образуемых однозарядными частицами с минимальной ионизирующей способностью на пути в 1 см при нормальном давлении.

Таблица 19

**Значение первичной удельной ионизации релятивистских частиц  $\nu_0$   
для некоторых газов**

Газ	H <sub>2</sub>	He	Ne	Воздух	Ar	Xe
$\nu_0, \text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$	6	6	12	21	29,4	44

Примечание. Первичная удельная ионизация  $\nu_0$  определяется как число пар ионов, образуемых релятивистской частицей на пути в 1 см при нормальном давлении.

Таблица 20

Значение постоянных  $U$  и  $n\lambda_0$  для некоторых газов

Постоянные	Водород	Гелий	Аргон	Воздух
$U, \text{ в}$	370	460	410	800
$n\lambda_0, \text{ мм} \cdot \text{мм рт. ст.}$	30	250	60	900

Таблица 21

Коэффициент рекомбинации ионов  $\alpha$  в некоторых газах

Газ	$\alpha \cdot 10^6, \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}$	Газ	$\alpha \cdot 10^6, \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}$
Аг (с примесями)	1,06	N <sub>2</sub>	1,06
O <sub>2</sub>	2,08	H <sub>2</sub>	0,28
Воздух	1,65		

Примечание. В таблице приведены значения коэффициента  $\alpha$  объемной рекомбинации, вычисленные при нормальных условиях.

Зависимость скорости дрейфа  $v$  электронов в некоторых газах от величины отношения  $E/p$ ,  
вычисленной в единицах ( $\text{э} \cdot 10^3, \text{ см/сек}$ )

Газ	$E/p, \text{ э/см} \cdot \text{мм рт. ст.}$											
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	15,0	
$\text{H}_2$	4,5	6,0	7,3	8,2	9,6	13	20	27	32	40	52	
Воздух	5	8	9,65	11	12	17	26	34	43	51	75	
$\text{N}_2$	4	5	6	7	8	14	22	31	38	45	63	
$\text{CO}_2$	1,8	3,2	5	7	9,3	12	34	60	—	—	—	
	$E/p, \text{ э/см} \cdot \text{мм рт. ст.}$											
	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	3	4	5	6
He	4	5,7	7	8,3	9	10,5	12	12,7	17,5	23,5	30,2	—
Ar	2,8	3,4	4,0	4,2	4,5	5,0	5,5	6,2	9,5	13	—	—
$\text{BF}_3$	40	80	125	150	185	212	240	270	385	490	585	665
Ne	5,4	7,0	9,0	12	—	—	24,0	26	40	52	64	75

Таблица 23

Зависимость скорости дрейфа электронов  $v$  в смеси 95% аргона и 5% углекислого газа от отношения  $E/p$ , вычисленной в единицах ( $v \cdot 10^6$ , см/сек)

$E/p$ , в/см·мм рт. ст.	0,03	0,05	0,16	0,22	0,45	0,6	0,76	1,5	2,25	3,9
$v$	0,55	1,00	2,3	3,7	4,5	4,4	4,2	4,5	4,3	4,6

Таблица 23а

Зависимость скорости дрейфа электронов  $v$  в смеси 9 см аргона и 1 см спирта от отношения  $E/p$ , вычисленной в единицах ( $v \cdot 10^5$ , см/сек)

$E/p$ , в/см·мм рт. ст.	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2—5,4
$v$	13	18	23	28	34	38	43	46	47

Подвижность ионов  $k_0$  в некоторых газах, вычисленная для нормального давления  $P_0$  (см<sup>2</sup>/в·сек)

Г а з	$k_0^+$	$k_0^-$	$k_0 = \text{const}$ при соотношении $E/p$
Воздух (сухой)	1,35	1,87	
Воздух (влажный)	1,36	1,51	
H <sub>2</sub> (чистый)	14,5	11,3	
H <sub>2</sub> (технический сухой)	5,9	8,2	
He (чистый)	От 5 до 20	До 500	≤ 10
He (технический)	5,1	6,3	≤ 10
Ne	От 4 до 6		≤ 8
Ar (технический)	1,4	1,7	≤ 40
Ar (чистый)	От ,6 до 2,6	До 200	≤ 40
O <sub>2</sub> (сухой)	1,32	1,85	
O <sub>2</sub> (влажный)	1,26	1,52	
CO <sub>2</sub>	0,84	0,98	
Kr	0,9—1,2		≤ 30
Xe	0,6—0,8		
N <sub>2</sub> (технический)	2,64	1,8	
N <sub>2</sub> (чистый)	2,64	До 145	

П р и м е ч а н и е. Подвижность для любого давления  $p$  определяется по формуле  $k_p = k_0 \cdot \frac{760}{p}$ .

Характеристика  $\beta$ -излучений некоторых радиоактивных изотопов

Изотоп	Период полураспада	Вид излучения	Максимальная энергия $\beta$ -излучения, Мэв
$^{60}_{27}\text{Co}$	5,27 года	$\beta$ , $\gamma$	1,478 0,6 <sup>30</sup> 0,309
$^{90}_{38}\text{Sr}$	28,4 года	$\beta$	0,535
$^{91}_{39}\text{Y}$	57,5 дня	$\beta$ , $\gamma$	1,550
$^{106}_{44}\text{Ru}$	1 год	$\beta$	0,0392
$^{112}_{49}\text{In}$	14 мин	$\beta^+$ , $\beta^-$	1,7 0,7
$^{137}_{55}\text{Cs}$	26,6 года	$\beta$	1,2
$^{144}_{58}\text{Ce}$	285 дней	$\beta$	0,32
$^{169}_{68}\text{Er}$	9 дней	$\beta$	0,33
$^{147}_{61}\text{Pm}$	2,64 года	$\beta$	0,223
$^{170}_{69}\text{Tm}$	129 дней	$\beta$ , $\gamma$	0,950



Сечение рассеяния нейтронов водородом

$\mathcal{E}, \text{кэВ}$	$\sigma_S, \text{барн}$	$\mathcal{E}, \text{кэВ}$	$\sigma_S, \text{барн}$	$\mathcal{E}, \text{кэВ}$	$\sigma_S, \text{барн}$
0	20,4	20	18,9	200	1,5
1	20,3	50	15,7	500	2,0
10	19,1	100	12,9	1000	2,5
					3,0

Таблица 27

Сводка данных по реакциям на медленных нейтронах с испусканием заряженных частиц

Реакция	Энергия, выделяющаяся при делении ядра, $M\text{эВ}$	Сечение поглощения тепловых нейтронов $\sigma_{\text{полг}}, \text{барн}$	Содержание изотопа, поглощающего нейтроны, %	Сечение для тепловых нейтронов на один атом, $\text{барн}$
$\text{Li}^6 (n, \alpha) \text{H}^3$	4,784	945	7,52	71,0
$\text{B}^{10} (n, \alpha) \text{Li}^7$	2,3	4030	18,8	760

Примечание. Сечение взаимодействия с ростом энергии нейтронов (не более 100  $\text{кэВ}$ ) приближенно вычисляется по формуле  $\sigma \approx 1/\sqrt{\mathcal{E}}$ .

## Плотность некоторых веществ (при нормальных условиях)

Вещество (твердое)	Плот- ность, г/см <sup>3</sup>	Вещество (жидкое)	Плот- ность, г/см <sup>3</sup>	Вещество (газ)	Плот- ность, г/л
Алюминий	2,7	Вода	1	Азот	1,25
Бор	2,33	Спирт (мети- ловый)	0,81	Аргон	1,78
Бромистое се- ребро	6,47	Спирт (эти- ловый)	0,791	Воздух	1,2928
Хлористое се- ребро	5,85	Эфир	0,736	Гелий	0,1785
Германий	5,32	Жидкий азот		Кислород	1,429
Индий	7,28			Ксенон	5,85
Иод	4,94			Метан	0,7168
Кадмий	8,65			Неон	0,9
Железо	7,7—7,9			Двуокись углерода	1,9768
Кремний	2,35			Окись углерода	1,25
Лед	0,917			Радон (газо- образный)	9,73
Медь	8,89			Фтористый бор	2,99
Никель	8,8			Водород	0,0899
Слюда	2,64				
Стекло	2,4—2,8				
Свинец	11,34				
Парафин	0,9				
Цинк	7,1				
Полоний	9,32				
Плутоний	16,4—19,8				
Радий	5,0				
Торий	11,5				
Нептуний	19,5				
Уран	18,7				
Литий	0,534				

Характеристики кристаллов германия и кремния

Параметры	Германий	Кремний
Атомный номер	32	14
Атомный вес	72,6	28,06
Концентрация атомов в $1 \text{ см}^3$	$4,4 \cdot 10^{22}$	$5 \cdot 10^{22}$
Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$	16	12,5
Ширина запрещенной зоны, эв	0,75	1,12
Удельная электрическая проводимость $\sigma_i$ при $T=300^\circ \text{ К}$ , $\text{ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	60	$1,57 \cdot 10^5$
Подвижность электронов $\mu_n$ при $T=300^\circ \text{ К}$ , $\text{см}^2 \cdot \text{в}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}$	3900	1500
Подвижность дырок $\mu_p$ при $T=300^\circ \text{ К}$ , $\text{см}^2 \cdot \text{в}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}$	1900	500
Коэффициент диффузии дырок $D_p$ , $\text{см}^2/\text{сек}$	44	13
Коэффициент диффузии электронов $D_n$ , $\text{см}^2/\text{сек}$	93	30
Среднее время жизни дырок $\tau_p$ при $T=300^\circ \text{ К}$ , сек	$(1 \div 10) \cdot 10^{-4}$	$(5 \div 50) \cdot 10^{-5}$
Среднее время жизни электронов $\tau_n$ при $T=300^\circ \text{ К}$ , сек	$(1 \div 10) \cdot 10^{-4}$	$(5 \div 50) \cdot 10^{-5}$
Плотность, г/см <sup>3</sup>	5,32	2,33
Диффузионная длина электрона $L_n$ , см	$(1 \div 3) \cdot 10^{-1}$	$(4 \div 10) \cdot 10^{-2}$
Диффузионная длина дырок $L_p$ , см	$(7 \div 20) \cdot 10^{-2}$	$(2 \div 60) \cdot 10^{-2}$

Таблица 30

Соотношение удельных теплоемкостей  $C_p/C_v$ 

Газ	$C_p/C_v$	Пар	$C_p/C_v$
Воздух	1,40	H <sub>2</sub> O	1,30
Ar	1,67	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	1,13
Ne	1,66	CH <sub>3</sub> OH	1,26
CO <sub>2</sub>	1,30		
H <sub>2</sub>	1,41		
N <sub>2</sub>	1,40		
O <sub>2</sub>	1,40		

Свойства некоторых органических и неорганических сцинтилляторов

Сцинтиллятор	Плотность, $g/cm^3$	Атомный номер	Молеку- лярный вес	Время вы- свечения $\tau$ , сек	Спектр испускания $\lambda$ , Å	Конверсионная эффективность (относитель- ная)*	Отношение конверсионных эффективно- стей** $\frac{\% \alpha}{\% \beta}$
NaJ (Tl)	3,67	50	149,92	$2,5 \cdot 10^{-7}$	4100	2	0,5
CsJ (Tl)	4,51	54	259,82	$5,5 \cdot 10^{-7}$	5600	0,6	0,5
LiJ (Tl)	4,06	52	133,86	$1,2 \cdot 10^{-6}$	4500	0,2	<1
ZnS (Ag)	4,10	27	97,45	$\sim 10^{-5}$	4400	2	1,5
$C_{14}H_{10}$ (антрацен)	1,25	5,8	178,22	$27 \cdot 10^{-9}$	4400	1	0,1
$C_{14}H_{12}$ (стильбен)	1,16	5,7	180,24	$8 \cdot 10^{-9}$	4100	0,4—0,5	0,08
$C_{10}H_8$ (нафталин)	1,145	5,8	128,16	$81 \cdot 10^{-9}$	3450	0,1—0,2	0,1
$C_{14}H_{10}$ (толан)	1,18	5,8	178,22	$7 \cdot 10^{-9}$	3900	0,3—0,5	0,07

\* Относительная конверсионная эффективность вычисляется по отношению к антрацену, конверсионная эффективность которого при облучении быстрыми электронами принята за единицу. Абсолютное значение конверсионной эффективности антрацена при облучении быстрыми электронами составляет 4—6%.

\*\*  $\frac{\% \alpha}{\% \beta}$  — отношение конверсионных эффективностей при возбуждении  $\alpha$ -частицами и быстрыми электронами. Для всех органических сцинтилляторов отношение конверсионных эффективностей при возбуждении  $\alpha$ -частицами и быстрыми электронами оказывается примерно одинаковым и составляет 0,1.

Свойства некоторых  $\alpha$ -активных элементов

Элемент	Изотоп элемента	Период полураспада	Период спонтанного деления	Энергия испускаемых частиц, $Mэв$	Плотность, $г/см^3$	Сечения деления для тепловых нейтронов
Полоний	$Po^{210}$ (RaF)	138 дней		5,297	9,32	
Эманация (радон, пиритон)	$Po^{212}$ (ThC')	$(3,0 \pm 0,15) \cdot 10^{-7}$ сек		8,776		
	$Po^{218}$ (RaA)	183 сек		5,998		
	$Em^{222}$	3,825 дня		5,486	9,73 $г/г$	
	$Ra^{226}$	1622 года		4,763	5	0,1 мбарн
Радий	$Th^{227}$	18,9 дня	$10^{14}$ лет	6,049		
Торий	$Th^{232}$	$1,39 \cdot 10^{10}$ лет	$1,4 \cdot 10^{18}$ лет	3,98 (25%) 4,00 (75%)	11,5	
Уран	$U^{234}$	$2,5 \cdot 10^5$ лет	$1,6 \cdot 10^{16}$	4,76		
	$U^{235}$ (AcU)	$7,07 \cdot 10^8$ лет	$1,8 \cdot 10^{17}$ лет	4,52 (20%) 4,396 (80%)	18,7	582 барн
	$U^{236}$	$2,4 \cdot 10^7$ лет	$2 \cdot 10^{16}$ лет	4,50		
	$U^{238}$	$4,51 \cdot 10^9$ лет	$8 \cdot 10^{15}$ лет	4,21		
Плутоний	$Pu^{239}$	$2,44 \cdot 10^4$ лет	$5,5 \cdot 10^{15}$ лет	5,15 5,13 5,10	16,4—19,8	742 барн
Нептуний	$Np^{237}$	$2,2 \cdot 10^6$ лет	$4,0 \cdot 10^{16}$ лет	4,8	19,5	

Некоторые часто встречающиеся постоянные

Постоянная	Числовое значение	lg
$\pi$	3,14	0,497
$2\pi$	6,28	0,798
$3\pi$	9,42	0,97
$4\pi$	12,566	1,099
$6\pi$	18,849	1,275
$\frac{4}{3}\pi$	4,18879	0,622
$\frac{1}{2}\pi$	1,57	0,196
$\sqrt{\pi}$	1,772	0,2485
e	2,718	0,4342
$\sqrt{e}$	1,648	0,217
$\ln 10$	2,3	0,36
$\ln \pi$	1,144	0,058

Таблица 33а

Факториалы некоторых чисел

Число	Значение факториала
0!	1
2!	2
3!	6
4!	24
5!	120
6!	720
7!	5040
8!	40320
9!	362880
10!	3628800
11!	39916800
12!	479001600
13!	6227020800
14!	87178291200
15!	1307674368000
16!	20922789888000
17!	355687428096000
18!	6402373705728000
19!	121645100408832000
20!	2432902008176640000

Соотношения между единицами времени

Единицы	Сутки	<i>ч</i>	<i>мин</i>	<i>сек</i>	<i>мсек</i>	<i>мксек</i>
1 сутки	1	24	1440	86400	$86,4 \cdot 10^6$	$86,4 \cdot 10^9$
1 час	1/24	1	60	3600	$3,6 \cdot 10^6$	$3,6 \cdot 10^9$
1 минута	1/1440	1/60	1	60	60000	$60 \cdot 10^6$
1 секунда	1/86400	1/3600	1/60	1	1000	$10^6$
1 миллисекунда	$1/86,4 \times 10^6$	$1/3,6 \times 10^6$	$1/6 \cdot 10^4$	$10^{-3}$	1	$10^3$
1 микросекунда	$1/86,4 \times 10^9$	$1/3,6 \times 10^9$	$1/60 \cdot 10^6$	$10^{-6}$	$10^{-3}$	1

Приставки для обозначения кратных и дольных единиц измерения

Наименование	Отношение к главной единице	Сокращенное обозначение	
		русское	международное
Пико	$10^{-12}$	<i>п</i>	p
Нано	$10^{-9}$	<i>н</i>	n
Микро	$10^{-6}$	<i>мк</i>	$\mu$
Милли	$10^{-3}$	<i>м</i>	m
Сант	$10^{-2}$	<i>с</i>	c
Деци	$10^{-1}$	<i>д</i>	d
Дека	10	<i>да</i>	da
Гекто	$10^2$	<i>г</i>	h
Кило	$10^3$	<i>к</i>	k
Мега	$10^6$	<i>М</i>	M
Гига	$10^9$	<i>Г</i>	G
Тера	$10^{12}$	<i>Т</i>	T

Таблица 36

## Соотношения между единицами длины

Единицы	<i>м</i>	<i>см</i>	<i>мм</i>	<i>мк</i>	$\text{\AA}$
1 метр	1	100	$10^3$	$10^6$	$10^{10}$
1 сантиметр	$10^{-2}$	1	10	$10^4$	$10^8$
1 миллиметр	$10^{-3}$	$10^{-1}$	1	$10^3$	$10^7$
1 микрон	$10^{-6}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	1	$10^4$
1 ангстрем	$10^{-10}$	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-4}$	1

Таблица 37

## Соотношения между единицами объема

Единицы	$\text{м}^3$	$\text{дм}^3$	$\text{см}^3$	$\text{мм}^3$
1 куб. метр	1	$10^3$	$10^6$	$10^9$
1 куб. дециметр	$10^{-3}$	1	$10^3$	$10^6$
1 куб. сантиметр	$10^{-6}$	$10^{-3}$	1	$10^3$
1 куб. миллиметр	$10^{-9}$	$10^{-6}$	$10^{-3}$	1



## Показательные функции

$x$	$e^x$	$e^{-x}$	$x$	$e^x$	$e^{-x}$
0,00	1,0000	1,0000	0,33	1,3910	0,7189
0,01	1,0101	0,9900	0,34	1,4049	0,7118
0,02	1,0202	0,9802	0,35	1,4191	0,7047
0,03	1,0305	0,9704	0,36	1,4333	0,6977
0,04	1,0408	0,9608	0,37	1,4477	0,6907
0,05	1,0513	0,9512	0,38	1,4623	0,6839
0,06	1,0618	0,9418	0,39	1,4770	0,6771
0,07	1,0725	0,9324	0,40	1,4918	0,6703
0,08	1,0833	0,9231	0,41	1,5068	0,6637
0,09	1,0942	0,9139	0,42	1,5220	0,6570
0,10	1,1052	0,9048	0,43	1,5373	0,6505
0,11	1,1163	0,8958	0,44	1,5527	0,6440
0,12	1,1275	0,8869	0,45	1,5683	0,6376
0,13	1,1388	0,8781	0,46	1,5841	0,6313
0,14	1,1503	0,8694	0,47	1,6000	0,6250
0,15	1,1618	0,8607	0,48	1,6161	0,6188
0,16	1,1735	0,8521	0,49	1,6323	0,6126
0,17	1,1853	0,8437	0,50	1,6487	0,6065
0,18	1,1972	0,8353	0,51	1,6653	0,6005
0,19	1,2092	0,8270	0,52	1,6820	0,5945
0,20	1,2214	0,8187	0,53	1,6989	0,5886
0,21	1,2337	0,8106	0,54	1,7160	0,5827
0,22	1,2461	0,8025	0,55	1,7333	0,5769
0,23	1,2586	0,7945	0,56	1,7507	0,5712
0,24	1,2712	0,7866	0,57	1,7683	0,5655
0,25	1,2840	0,7788	0,58	1,7860	0,5599
0,26	1,2969	0,7711	0,59	1,8040	0,5543
0,27	1,3100	0,7634	0,60	1,8221	0,5488
0,28	1,3231	0,7558	0,61	1,8404	0,5434
0,29	1,3364	0,7483	0,62	1,8589	0,5379
0,30	1,3499	0,7408	0,63	1,8776	0,5326
0,31	1,3634	0,7334	0,64	1,8965	0,5273
0,32	1,3771	0,7261	0,65	1,9155	0,5220

$x$	$e^x$	$e^{-x}$	$x$	$e^x$	$e^{-x}$
0,66	1,9348	0,5169	1,00	2,7183	0,3679
0,67	1,9542	0,5117	1,01	2,7456	0,3642
0,68	1,9739	0,5066	1,02	2,7732	0,3606
0,69	1,9937	0,5016	1,03	2,8011	0,3570
0,70	2,0138	0,4966	1,04	2,8292	0,3535
0,71	2,0340	0,4916	1,05	2,8577	0,3499
0,72	2,0544	0,4868	1,06	2,8864	0,3465
0,73	2,0751	0,4819	1,07	2,9154	0,3430
0,74	2,0959	0,4771	1,08	2,9447	0,3396
0,75	2,1170	0,4724	1,09	2,9743	0,3362
0,76	2,1383	0,4677	1,10	3,0042	0,3329
0,77	2,1598	0,4630	1,11	3,0344	0,3296
0,78	2,1815	0,4584	1,12	3,0649	0,3263
0,79	2,2034	0,4538	1,13	3,0957	0,3230
0,80	2,2250	0,4493	1,14	3,1268	0,3198
0,81	2,2479	0,4449	1,15	3,1582	0,3166
0,82	2,2705	0,4404	1,16	3,1899	0,3135
0,83	2,2933	0,4360	1,17	3,2220	0,3104
0,84	2,3164	0,4317	1,18	3,2544	0,3073
0,85	2,3396	0,4274	1,19	3,2871	0,3042
0,86	2,3632	0,4232	1,20	3,3201	0,3012
0,87	2,3869	0,4190	1,21	3,3535	0,2982
0,88	2,4109	0,4148	1,22	3,3872	0,2952
0,89	2,4351	0,4107	1,23	3,4212	0,2923
0,90	2,4596	0,4066	1,24	3,4556	0,2894
0,91	2,4843	0,4025	1,25	3,4903	0,2865
0,92	2,5093	0,3985	1,26	3,5254	0,2837
0,93	2,5345	0,3946	1,27	3,5609	0,2808
0,94	2,5600	0,3906	1,28	3,5966	0,2780
0,95	2,5857	0,3867	1,29	3,6328	0,2753
0,96	2,6117	0,3829	1,30	3,6693	0,2725
0,97	2,6379	0,3791	1,31	3,7062	0,2698
0,98	2,6645	0,3753	1,32	3,7434	0,2671
0,99	2,6912	0,3716	1,33	3,7810	0,2645

$x$	$e^x$	$e^{-x}$	$x$	$e^x$	$e^{-x}$
1,34	3,8190	0,2618	1,67	5,3122	0,1882
1,35	3,8574	0,2592	1,68	5,3656	0,1864
1,36	3,8962	0,2567	1,69	5,4195	0,1845
1,37	3,9354	0,2541	1,70	5,4739	0,1827
1,38	3,9749	0,2516	1,71	5,5290	0,1809
1,39	4,0149	0,2491	1,72	5,5845	0,1791
1,40	4,0552	0,2466	1,73	5,6407	0,1773
1,41	4,0960	0,2441	1,74	5,6973	0,1755
1,42	4,1371	0,2417	1,75	5,7546	0,1738
1,43	4,1787	0,2393	1,76	5,8124	0,1720
1,44	4,2207	0,2369	1,77	5,8709	0,1703
1,45	4,2631	0,2346	1,78	5,9299	0,1686
1,46	4,3060	0,2322	1,79	5,9895	0,1670
1,47	4,3492	0,2299	1,80	6,0496	0,1653
1,48	4,3929	0,2276	1,81	6,1104	0,1637
1,49	4,4371	0,2254	1,82	6,1719	0,1620
1,50	4,4817	0,2231	1,83	6,2339	0,1604
1,51	4,5267	0,2209	1,84	6,2965	0,1588
1,52	4,5722	0,2187	1,85	6,3598	0,1572
1,53	4,6182	0,2165	1,86	6,4237	0,1557
1,54	4,6646	0,2144	1,87	6,4883	0,1541
1,55	4,7115	0,2122	1,88	6,5535	0,1526
1,56	4,7588	0,2101	1,89	6,6194	0,1511
1,57	4,8066	0,2080	1,90	6,6859	0,1496
1,58	4,8550	0,2060	1,91	6,7531	0,1481
1,59	4,9037	0,2039	1,92	6,8210	0,1466
1,60	4,9530	0,2019	1,93	6,8895	0,1451
1,61	5,0028	0,1999	1,94	6,9588	0,1437
1,62	5,0531	0,1979	1,95	7,0287	0,1423
1,63	5,1039	0,1959	1,96	7,0993	0,1409
1,64	5,1552	0,1940	1,97	7,1707	0,1395
1,65	5,2070	0,1920	1,98	7,2427	0,1381
1,66	5,2593	0,1901	1,99	7,3155	0,1367

$x$	$e^x$	$e^{-x}$	$x$	$e^x$	$e^{-x}$
2,00	7,3891	0,1353	2,34	10,381	0,09633
2,01	7,4633	0,1340	2,35	10,486	0,09537
2,02	7,5383	0,1327	2,36	10,591	0,09442
2,03	7,6141	0,1313	2,37	10,697	0,09348
2,04	7,6906	0,1300	2,38	10,805	0,09255
2,05	7,7679	0,1287	2,39	10,913	0,09163
2,06	7,8460	0,1275	2,40	11,023	0,09072
2,07	7,9248	0,1262	2,41	11,134	0,08982
2,08	8,0045	0,1249	2,42	11,246	0,08892
2,09	8,0849	0,1237	2,43	11,359	0,08804
2,10	8,1662	0,1225	2,44	11,473	0,08716
2,11	8,2482	0,1212	2,45	11,588	0,08629
2,12	8,3311	0,1200	2,46	11,705	0,08543
2,13	8,4149	0,1188	2,47	11,822	0,08458
2,14	8,4994	0,1177	2,48	11,941	0,08374
2,15	8,5849	0,1165	2,49	12,061	0,08291
2,16	8,6711	0,1153	2,50	12,182	0,08208
2,17	8,7583	0,1142	2,51	12,305	0,08127
2,18	8,8463	0,1130	2,52	12,429	0,08046
2,19	8,9352	0,1119	2,53	12,554	0,07966
2,20	9,0250	0,1108	2,54	12,680	0,07887
2,21	9,1157	0,1097	2,55	12,807	0,07808
2,22	9,2073	0,1086	2,56	12,936	0,07730
2,23	9,2999	0,1075	2,57	13,066	0,07654
2,24	9,3933	0,1065	2,58	13,197	0,07577
2,25	9,4877	0,1054	2,59	13,330	0,07502
2,26	9,5831	0,1044	2,60	13,464	0,07427
2,27	9,6794	0,1033	2,61	13,599	0,07353
2,28	9,7767	0,1023	2,62	13,736	0,07280
2,29	9,8749	0,1013	2,63	13,874	0,07208
2,30	9,9742	0,10025	2,64	14,013	0,07136
2,31	10,074	0,09926	2,65	14,154	0,07065
2,32	10,176	0,09827	2,66	14,296	0,06995
2,33	10,278	0,09730	2,67	14,440	0,06925

$x$	$e^x$	$e^{-x}$	$x$	$e^x$	$e^{-x}$
2,68	14,585	0,06856	3,00	20,086	0,04979
2,69	14,732	0,06788	3,01	20,287	0,04929
2,70	14,880	0,06721	3,02	20,491	0,04880
2,71	15,029	0,06654	3,03	20,697	0,04832
2,72	15,180	0,06587	3,04	20,905	0,04783
2,73	15,333	0,06522	3,05	21,115	0,04736
2,74	15,487	0,06457	3,06	21,328	0,04689
2,75	15,643	0,06393	3,07	21,542	0,04642
2,76	15,800	0,06329	3,08	21,758	0,04596
2,77	15,959	0,06266	3,09	21,977	0,04550
2,78	16,119	0,06204	3,10	22,198	0,04505
2,79	16,281	0,06142	3,11	22,421	0,04460
2,80	16,445	0,06081	3,12	22,646	0,04416
2,81	16,610	0,06020	3,13	22,874	0,04372
2,82	16,777	0,05961	3,14	23,104	0,04328
2,83	16,945	0,05901	3,15	23,336	0,04285
2,84	17,116	0,05843	3,16	23,571	0,04243
2,85	17,288	0,05784	3,17	23,807	0,04200
2,86	17,462	0,05727	3,18	24,047	0,04159
2,87	17,637	0,05670	3,19	24,288	0,04117
2,88	17,814	0,05613	3,20	24,533	0,04076
2,89	17,993	0,05558	3,21	24,779	0,04036
2,90	18,174	0,05502	3,22	25,028	0,03996
2,91	18,357	0,05448	3,23	25,280	0,03956
2,92	18,541	0,05393	3,24	25,534	0,03916
2,93	18,728	0,05340	3,25	25,790	0,03877
2,94	18,916	0,05287	3,26	26,050	0,03839
2,95	19,106	0,05234	3,27	26,311	0,03801
2,96	19,298	0,05182	3,28	26,576	0,03763
2,97	19,492	0,05130	3,29	26,843	0,03725
2,98	19,688	0,05079	3,30	27,113	0,03688
2,99	19,886	0,05029	3,31	27,385	0,03652

$x$	$e^x$	$e^{-x}$	$x$	$e^x$	$e^{-x}$
3,32	27,660	0,03615	3,66	38,861	0,02573
3,33	27,938	0,03579	3,67	39,252	0,02548
3,34	28,219	0,03544	3,68	39,646	0,02522
3,35	28,503	0,03508	3,69	40,045	0,02497
3,36	28,789	0,03474	3,70	40,447	0,02472
3,37	29,079	0,03439	3,71	40,854	0,02448
3,38	29,371	0,03405	3,72	41,264	0,02423
3,39	29,666	0,03371	3,73	41,679	0,02399
3,40	29,964	0,03337	3,74	42,098	0,02375
3,41	30,265	0,03304	3,75	42,521	0,02352
3,42	30,569	0,03271	3,76	42,948	0,02328
3,43	30,877	0,03239	3,77	43,380	0,02305
3,44	31,187	0,03206	3,78	43,816	0,02282
3,45	31,500	0,03175	3,79	44,256	0,02260
3,46	31,817	0,03143	3,80	44,701	0,02237
3,47	32,137	0,03112	3,81	45,150	0,02215
3,48	32,460	0,03081	3,82	45,604	0,02193
3,49	32,786	0,03050	3,83	46,063	0,02171
3,50	33,115	0,03020	3,84	46,525	0,02149
3,51	33,448	0,02990	3,85	46,993	0,02128
3,52	33,784	0,02960	3,86	47,465	0,02107
3,53	34,124	0,02930	3,87	47,942	0,02086
3,54	34,467	0,02901	3,88	48,424	0,02065
3,55	34,813	0,02872	3,89	48,911	0,02045
3,56	35,163	0,02844	3,90	49,402	0,02024
3,57	35,517	0,02816	3,91	49,899	0,02004
3,58	35,874	0,02788	3,92	50,400	0,01984
3,59	36,234	0,02760	3,93	50,907	0,01964
3,60	36,598	0,02732	3,94	51,419	0,01945
3,61	36,966	0,02705	3,95	51,935	0,01925
3,62	37,338	0,02678	3,96	52,457	0,01906
3,63	37,713	0,02652	3,97	52,985	0,01887
3,64	38,092	0,02625	3,98	53,517	0,01869
3,65	38,475	0,02599	3,99	54,055	0,01850

$x$	$e^x$	$e^{-x}$	$x$	$e^x$	$e^{-x}$
4,0	54,598	0,01832	7,0	1096,6	0,000912
4,1	60,340	0,01657	7,1	1212,0	0,000825
4,2	66,686	0,01500	7,2	1339,4	0,000747
4,3	73,700	0,01357	7,3	1480,5	0,000676
4,4	81,451	0,01228	7,4	1636,0	0,000611
4,5	90,017	0,01111	7,5	1808,0	0,000553
4,6	99,484	0,01005	7,6	1998,2	0,000500
4,7	109,95	0,00910	7,7	2208,3	0,000453
4,8	121,51	0,00823	7,8	2440,6	0,000410
4,9	134,29	0,00745	7,9	2697,3	0,000371
5,0	148,41	0,00674	8,0	2981,0	0,000335
5,1	164,02	0,00610	8,1	3294,5	0,000304
5,2	181,27	0,00552	8,2	3641,0	0,000275
5,3	200,34	0,00499	8,3	4023,9	0,000249
5,4	221,41	0,00452	8,4	4447,1	0,000225
5,5	244,69	0,00409	8,5	4 914,8	0,000203
5,6	270,43	0,00370	8,6	5431,7	0,000184
5,7	298,87	0,00335	8,7	6002,9	0,000167
5,8	330,30	0,00303	8,8	6634,2	0,000151
5,9	365,04	0,00274	8,9	7332,0	0,000136
6,0	403,43	0,002479	9,0	8103,1	0,000123
6,1	445,86	0,002243	9,1	8955,3	0,000112
6,2	492,75	0,002029	9,2	9897,1	0,000101
6,3	544,57	0,001836	9,3	10938	0,000091
6,4	601,85	0,001662	9,4	12088	0,000083
6,5	665,14	0,001503	9,5	13360	0,000075
6,6	735,10	0,001360	9,6	14765	0,000068
6,7	812,41	0,001231	9,7	16318	0,000061
6,8	897,85	0,001114	9,8	18034	0,000055
6,9	992,27	0,001008	9,9	19930	0,000050
			10,0	22026	0,000045

ГРАФИКИ

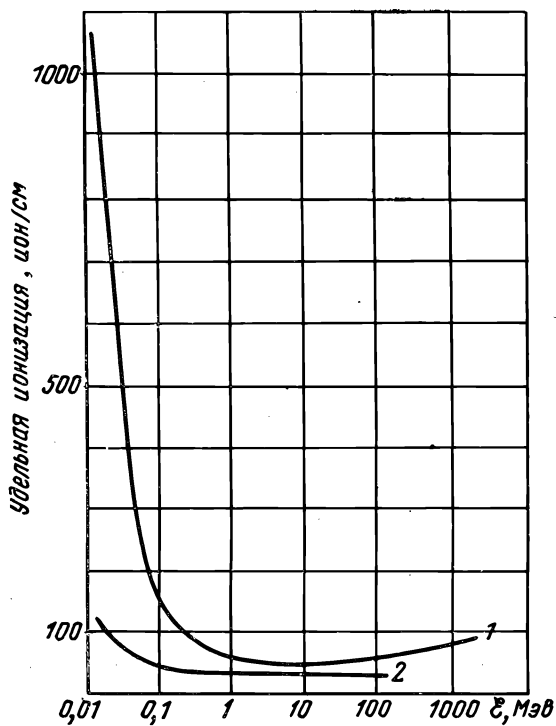


График 1. Зависимость удельной ионизации электронов в воздухе ( $15^{\circ}\text{C}$ , 760 мм рт. ст.) от энергии: 1 — общая удельная ионизация; 2 — первичная удельная ионизация.



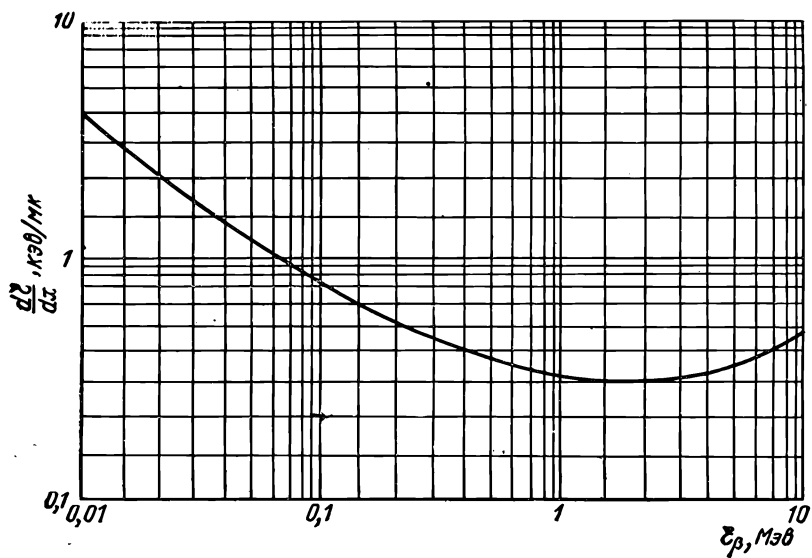


График 2. Зависимость удельных потерь энергии электронов  $\frac{dE}{dx}$  в кремнии.

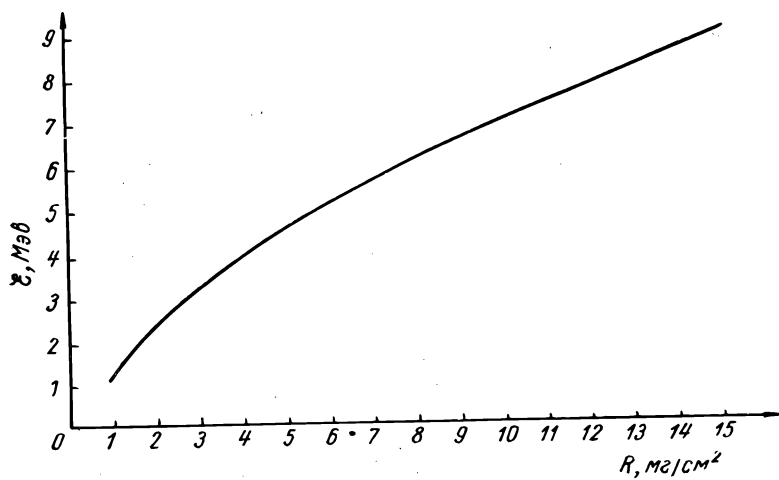


График 3. Длина пробега  $R$   $\alpha$ -частиц в алюминии.

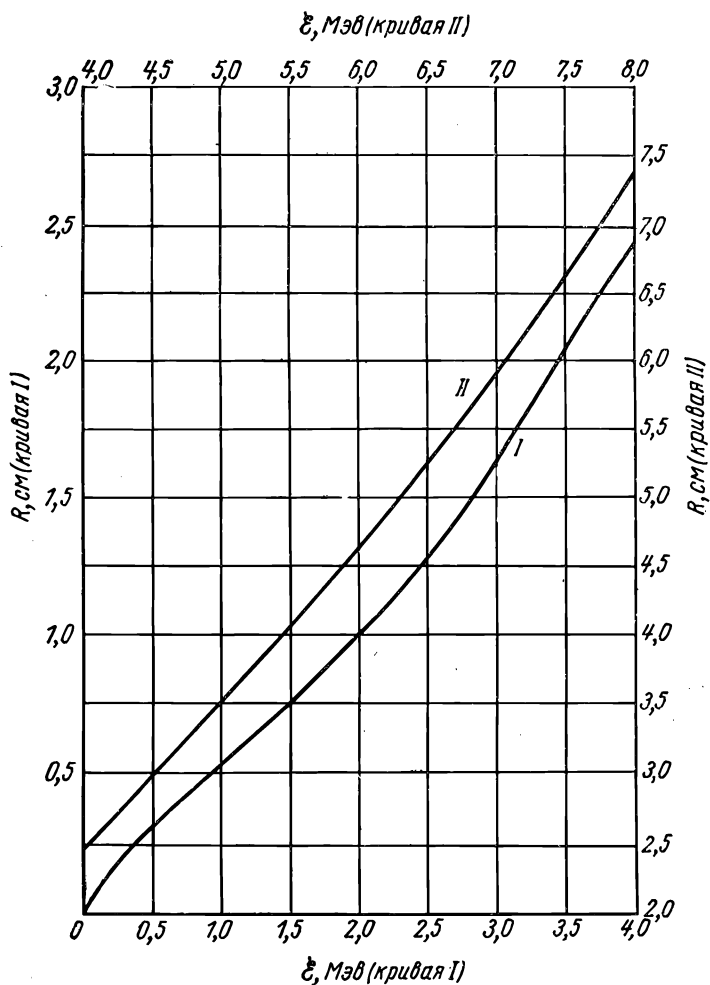


График 4. Зависимость пробега  $R$   $\alpha$ -частиц в воздухе ( $15^\circ \text{C}$ ,  $760 \text{ мм рт. ст.}$ ) от энергии в диапазоне  $0-8 \text{ Мэв}$ .

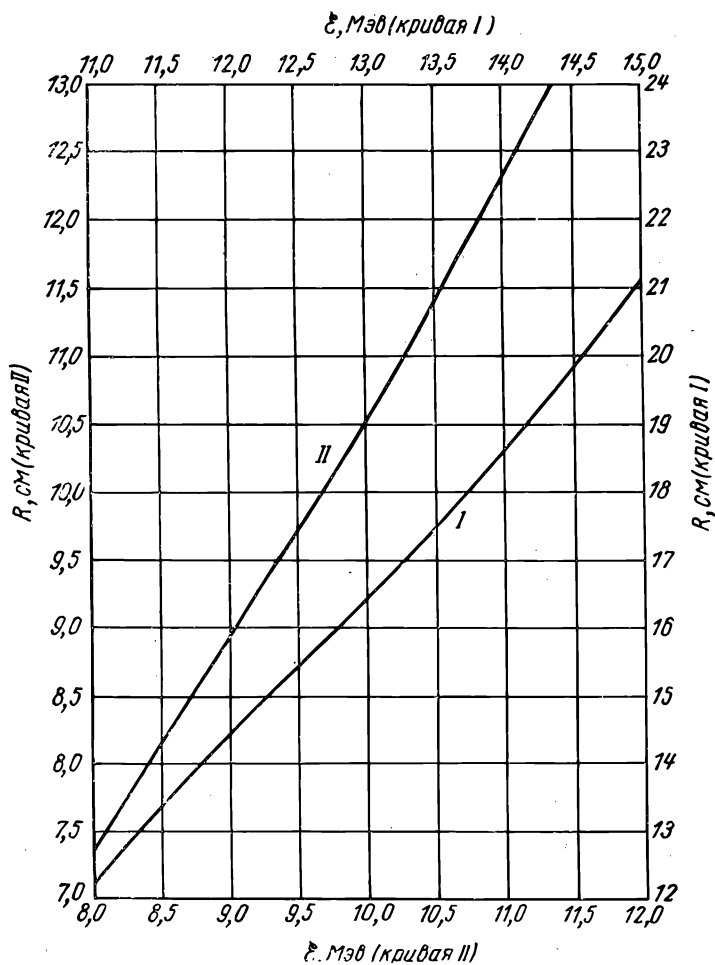


График 5. Зависимость пробега  $R$   $\alpha$ -частиц в воздухе ( $15^\circ \text{C}$ , 760 мм рт. ст.) от энергии в диапазоне 8—15 Мэв.

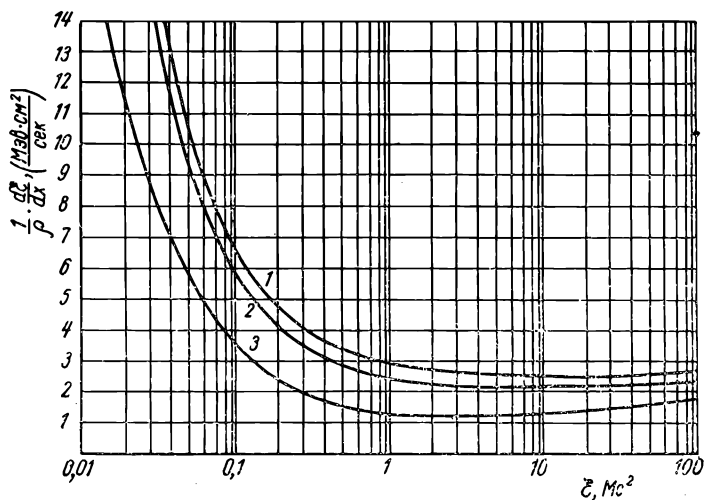


График 6. Зависимость ионизационных потерь энергии  $\frac{d\mathcal{E}}{dx}$  для тяжелых однозарядных частиц: 1 — воздух; 2 — алюминий; 3 — свинец.

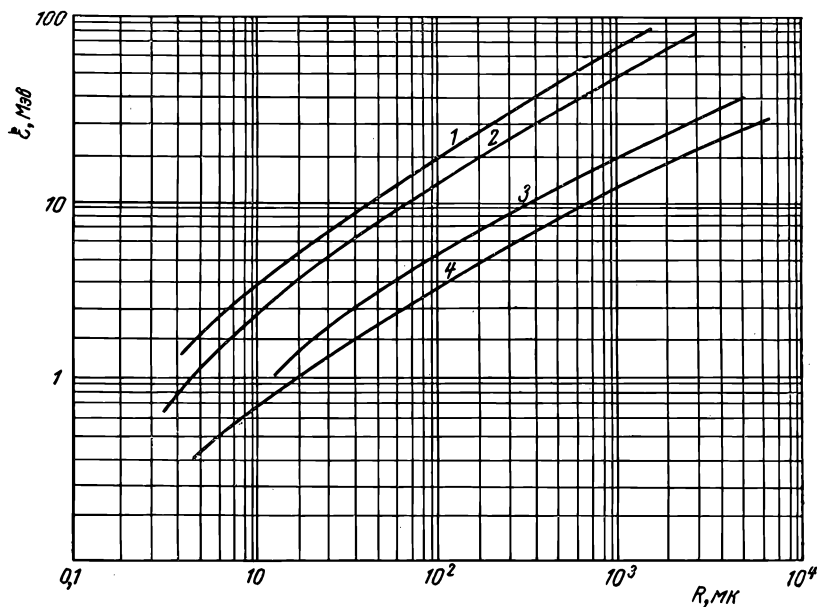


График 7. Соотношение между пробегом  $R$  и энергией  $\mathcal{E}$  для протонов и α-частиц в кремнии и германии.  
α-Частицы: 1 — германий; 2 — кремний; протоны: 3 — германий; 4 — кремний.

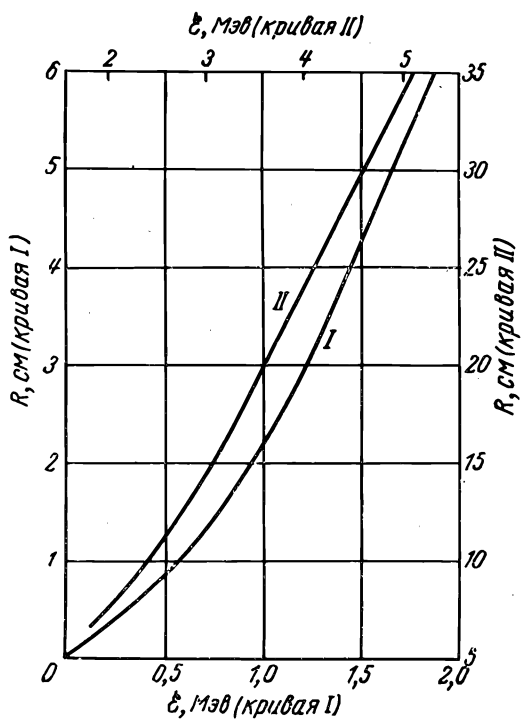


График 8. Зависимость пробега протона  $R$  в воздухе ( $15^\circ\text{C}$ ,  $760\text{ мм рт. ст.}$ ) от энергии  $E$  в диапазоне  $0\text{—}5\text{ Мэв}$ .

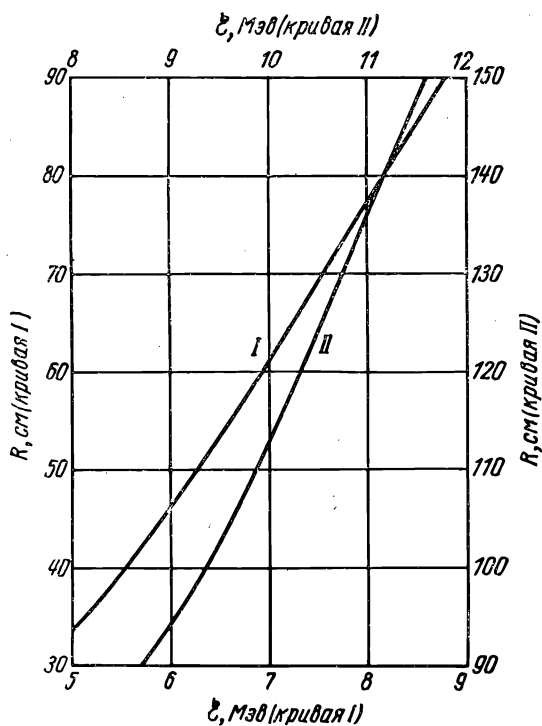


График 9. Зависимость пробега протона  $R$  в воздухе ( $15^{\circ}\text{C}$ , 760 мм рт. ст.) от энергии в диапазоне 5—12 Мэв.

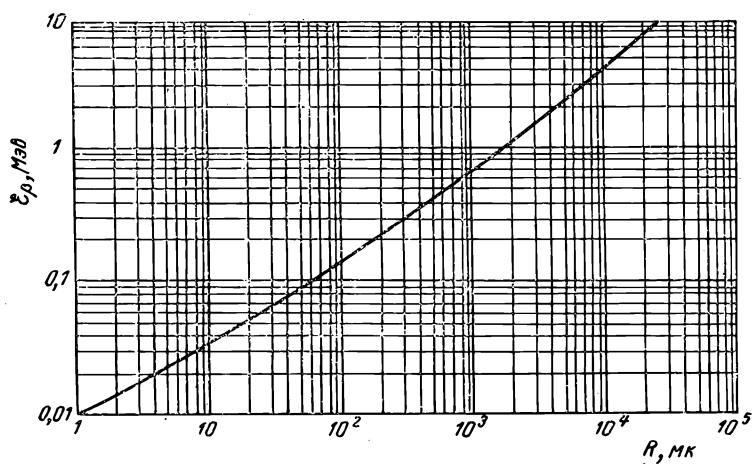


График 10. Соотношение между пробегом  $R$  и энергией электрона  $\epsilon$  для кремния.

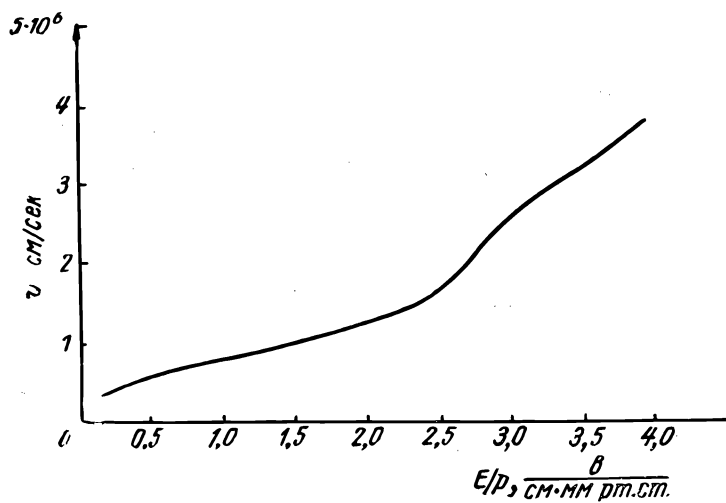


График 11. Зависимость скорости дрейфа электронов  $v$  от отношения  $E/\rho$  в гелии.

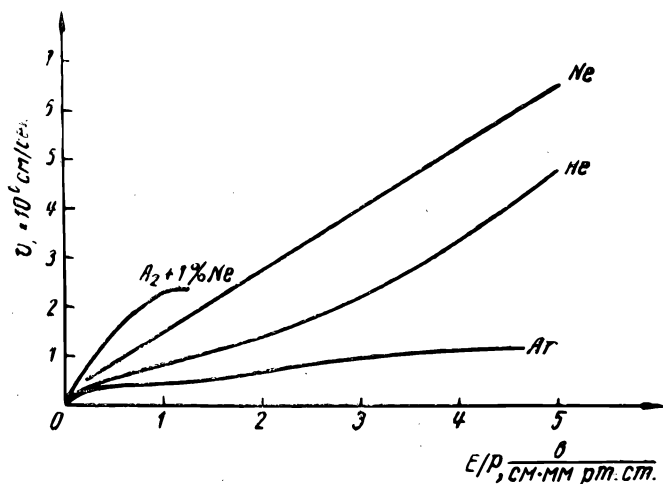


График 12. Зависимость скорости дрейфа электронов  $v$  от отношения  $E/p$  для некоторых газов.

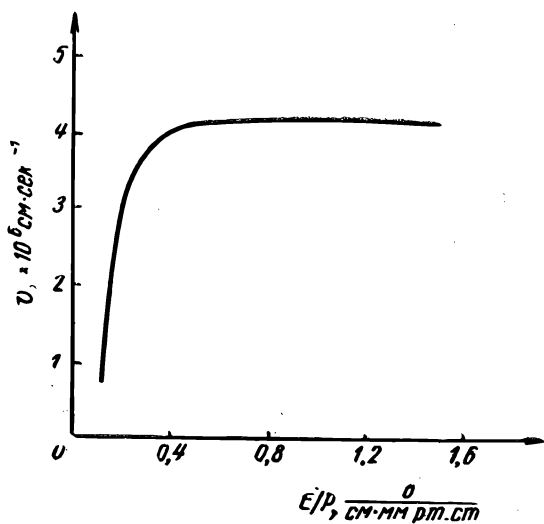
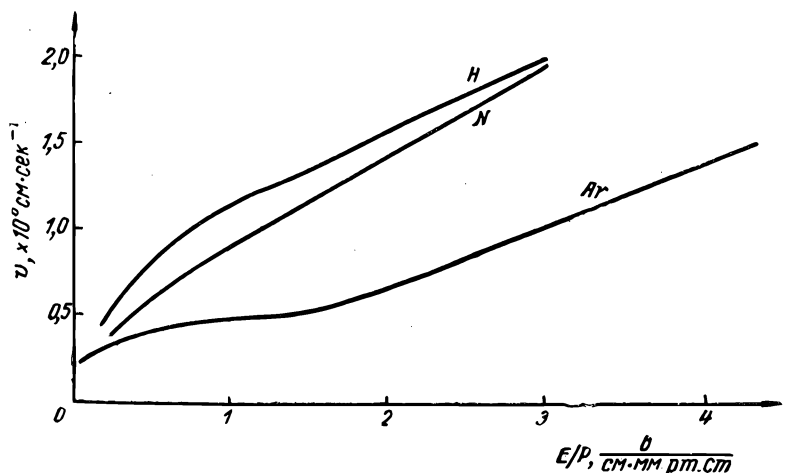
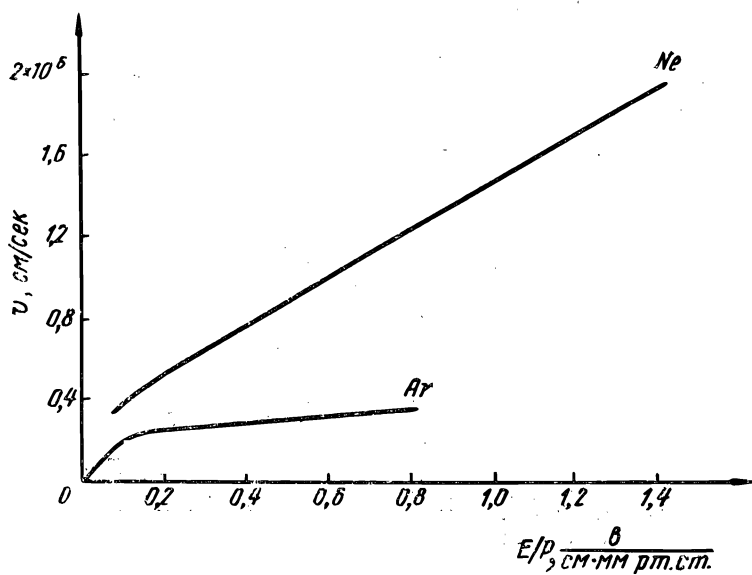


График 13. Зависимость скорости дрейфа электронов  $v$  в смеси 95% аргона и 5% углекислого газа от отношения  $E/p$ .





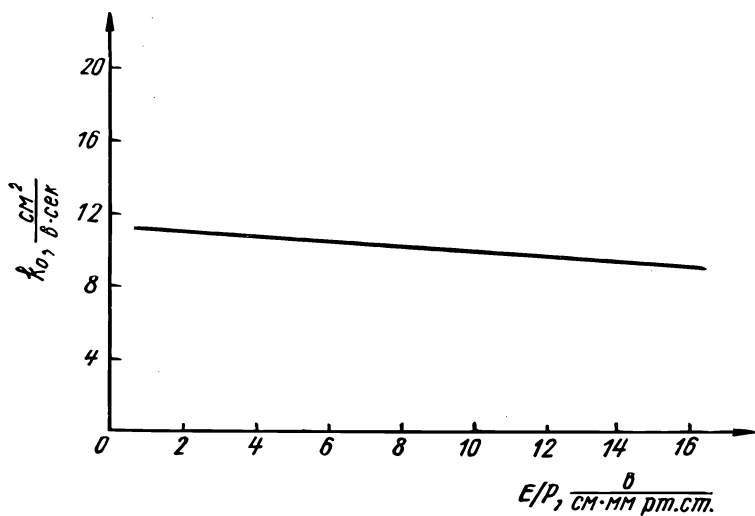


График 16. Подвижность положительных ионов гелия ( $k_0$ ) в гелии.

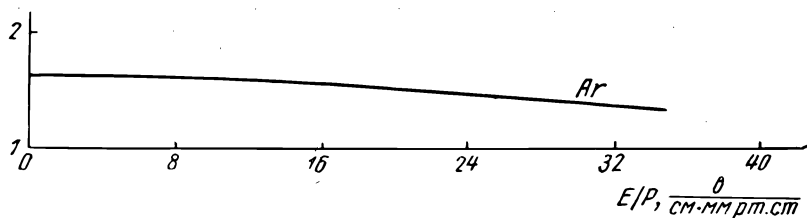


График 17. Подвижность положительных ионов аргона ( $k_0$ ) в аргоне.

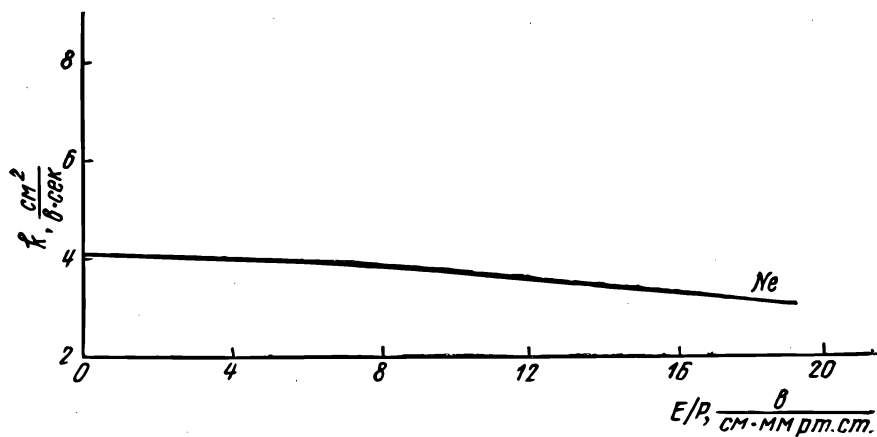


График 18. Подвижность положительных ионов неона ( $k_0$ ) в неоне.

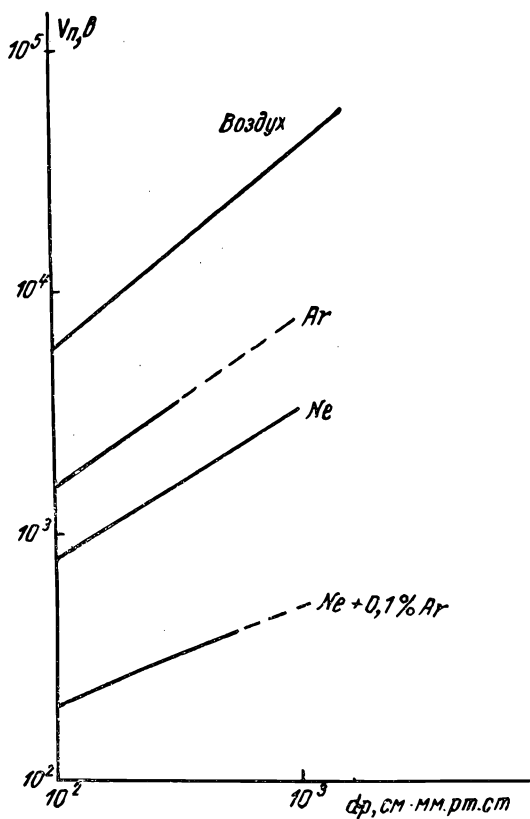


График 19. Зависимость пробивного потенциала напряжения  $V$  от произведения  $d\rho$  для некоторых газов.

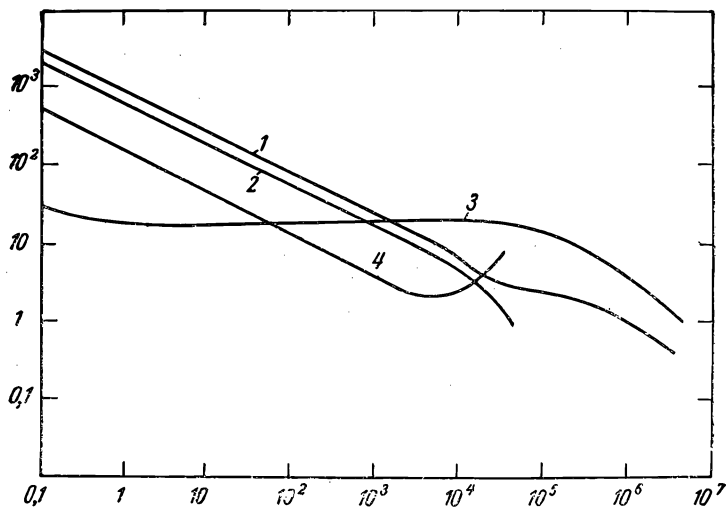


График 20. Зависимость эффективных сечений (барн) некоторых вызываемых нейтронами реакций, важных для регистрации нейтронов, от энергии нейтронов (Мэв): 1 —  $\text{He}^3 (n, p) \text{H}^3$ ; 2 —  $\text{B}^{10} (n, \alpha) \text{Li}^7$ ; 3 —  $\text{H}^1 (n, n) p$ ; 4 —  $\text{Li}^6 (n, \alpha) \text{H}^3$ .

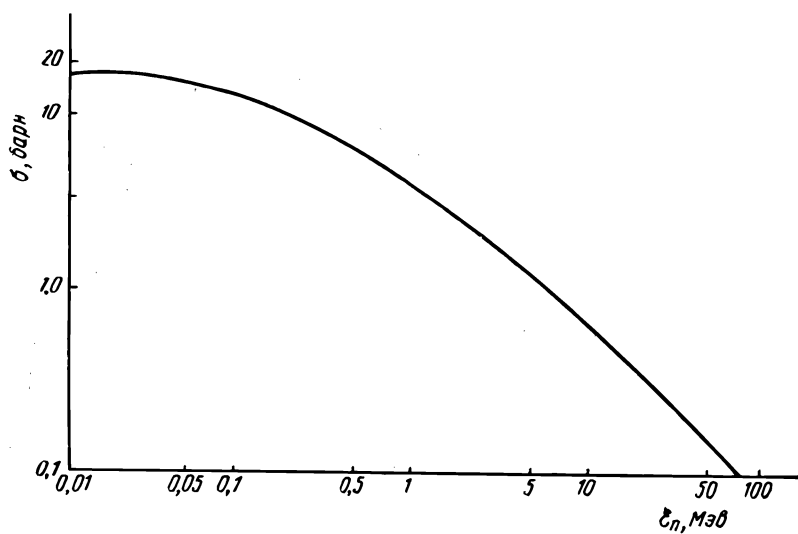


График 21. Зависимость полного сечения водорода от энергии нейтрона  $\epsilon_n$ .

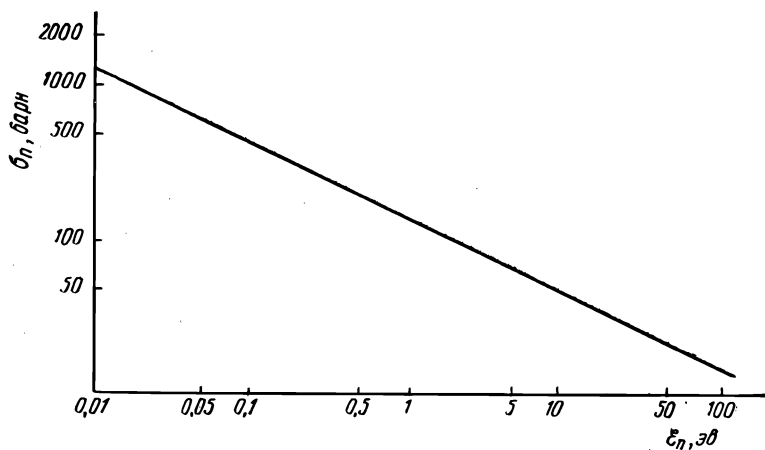


График 22. Зависимость полного сечения бора от энергии нейтрона  $\epsilon_n$ .

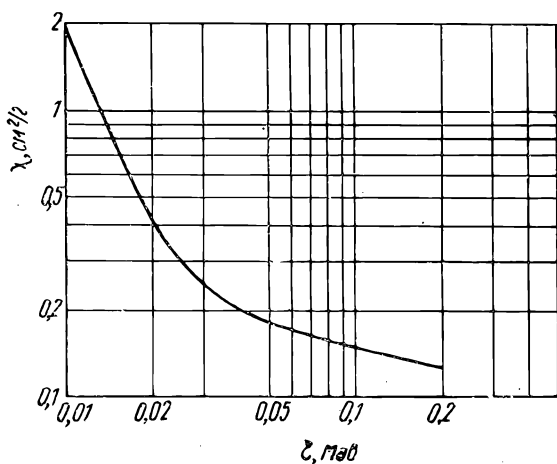


График 23. Зависимость массового коэффициента поглощения  $\chi$  для узкого пучка от энергии  $\gamma$ -квантов (0,01—0,2 Мэв) в углеродном поглотителе.

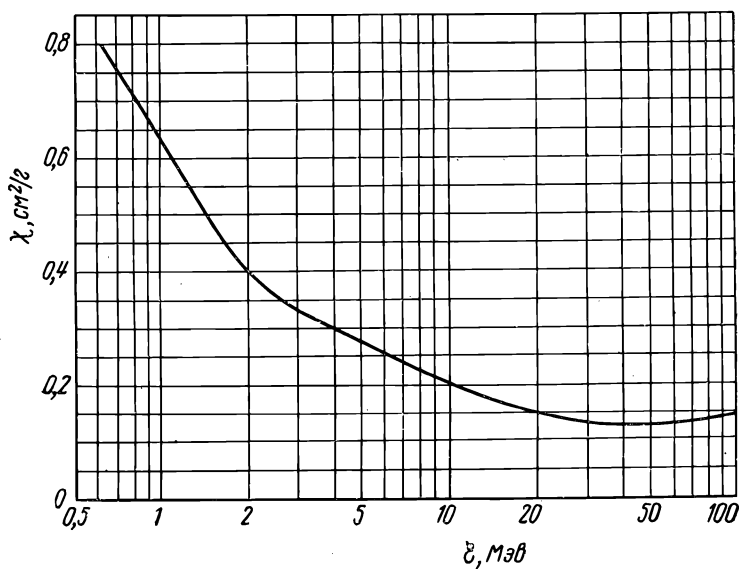


График 24. Зависимость массового коэффициента  $\chi$  для узкого пучка от энергии  $\gamma$ -квантов (0,5—100 Мэв) в углеродном поглотителе.

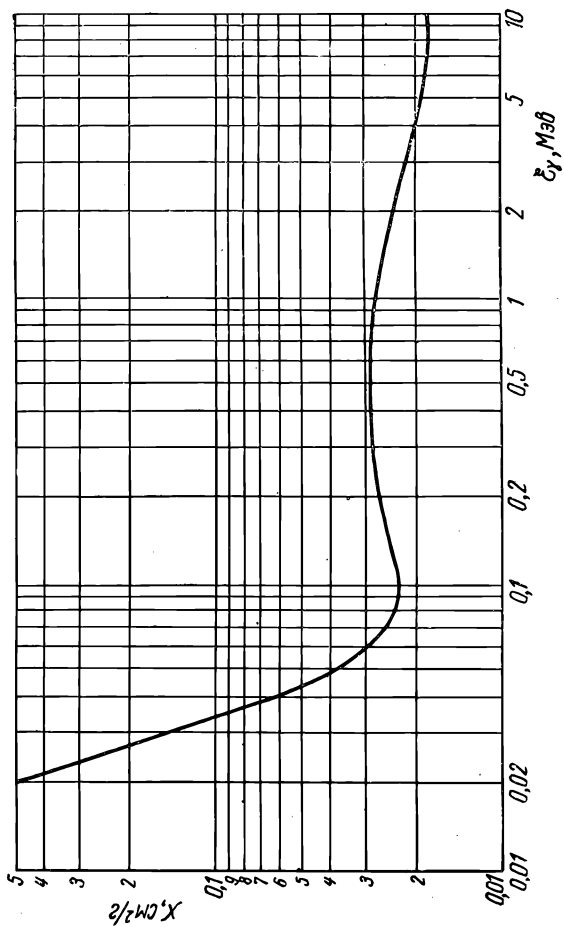


График 25. Зависимость массового коэффициента поглощения энергии  $\chi_a$   $\gamma$ -квантов в воздухе от величины энергии.

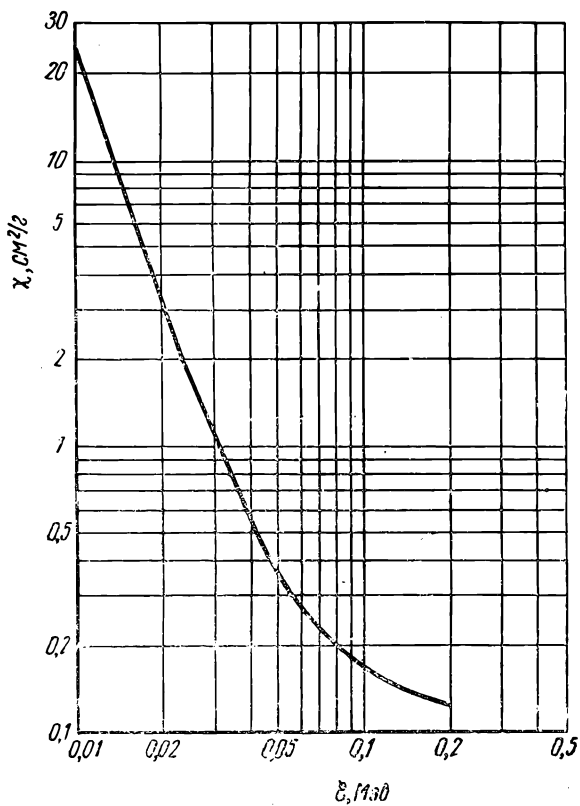


График 26. Зависимость массового коэффициента поглощения  $\chi$  для узкого пучка от энергии  $\gamma$ -квантов (0,01—0,5 Мэв) в алюминиевом поглотителе.



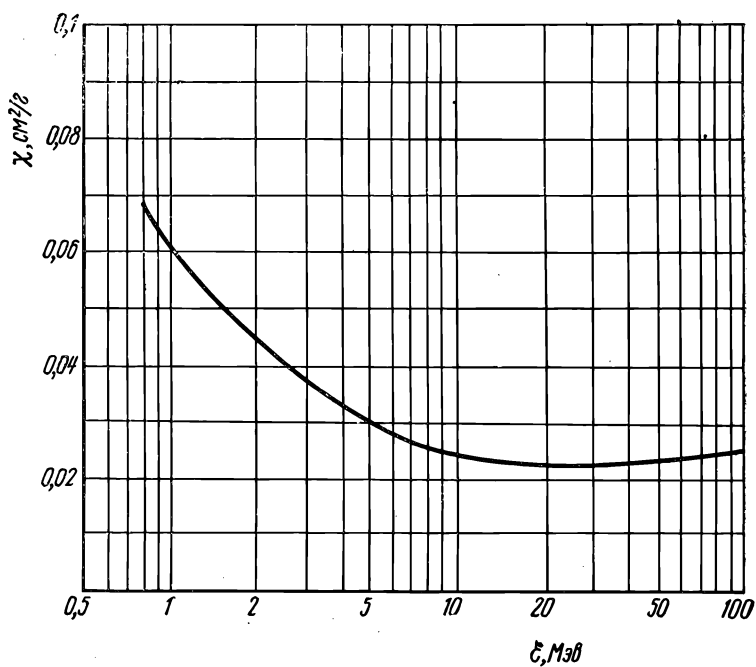


График 27. Зависимость массового коэффициента поглощения  $\chi$  для узкого пучка от энергии  $\gamma$ -квантов (0,5—100 Мэв) в алюминиевом поглотителе.

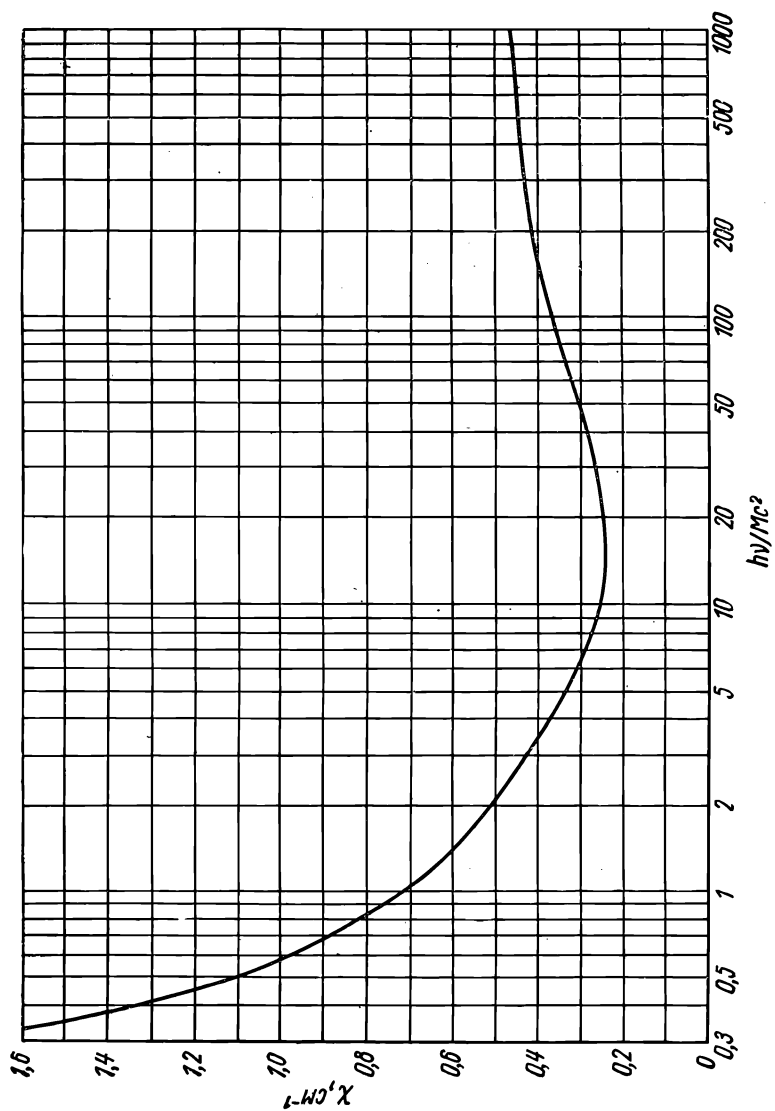


График 28. Зависимость полного коэффициента поглощения  $\chi$   $\gamma$ -квантов от энергии в меди.

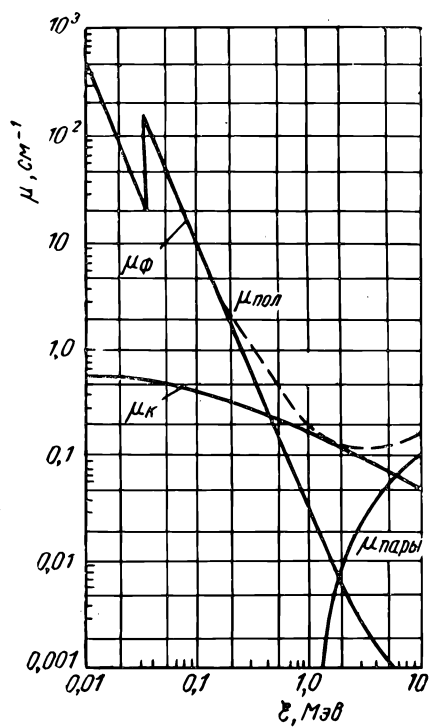


График 29. Зависимость полного линейного коэффициента поглощения  $\mu$  и его отдельных составляющих от энергии  $\gamma$ -квантов в кристалле NaJ(Tl).

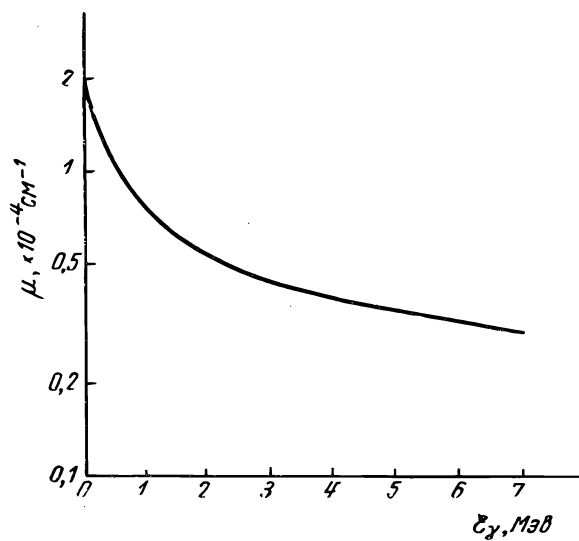


График 30. Зависимость полного коэффициента поглощения  $\mu$   $\gamma$ -квантов от энергии в воздухе.

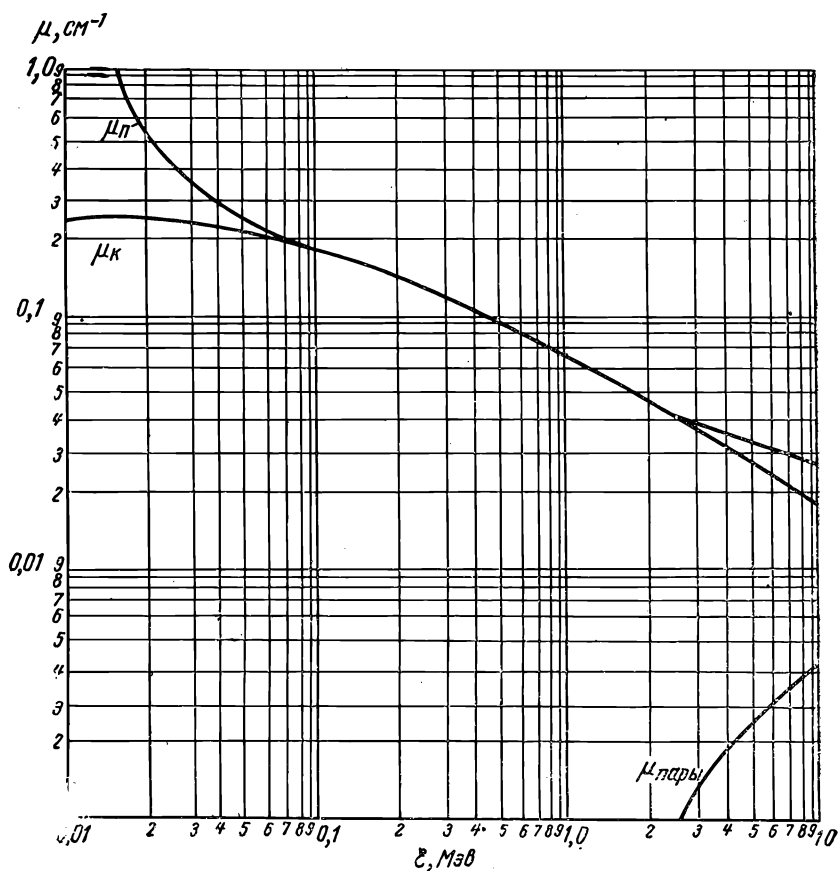


График 31. Зависимость полного коэффициента поглощения  $\mu$  и его отдельных составляющих от энергии  $\gamma$ -квантов в кристалле антрацена.

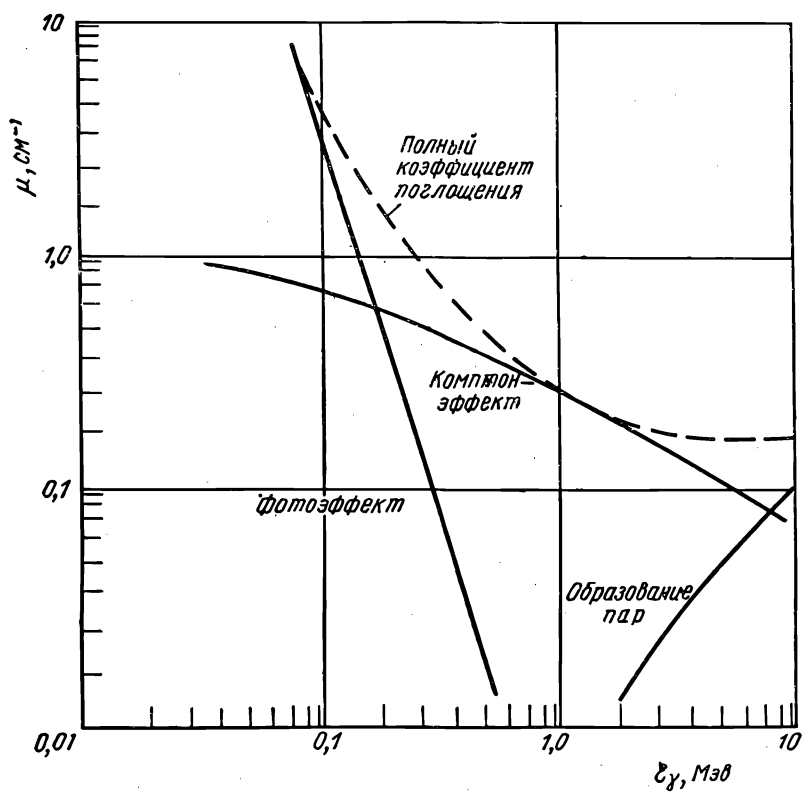


График 32. Зависимость полного коэффициента поглощения  $\mu$  и его отдельных составляющих от энергии  $\gamma$ -квантов в германии.

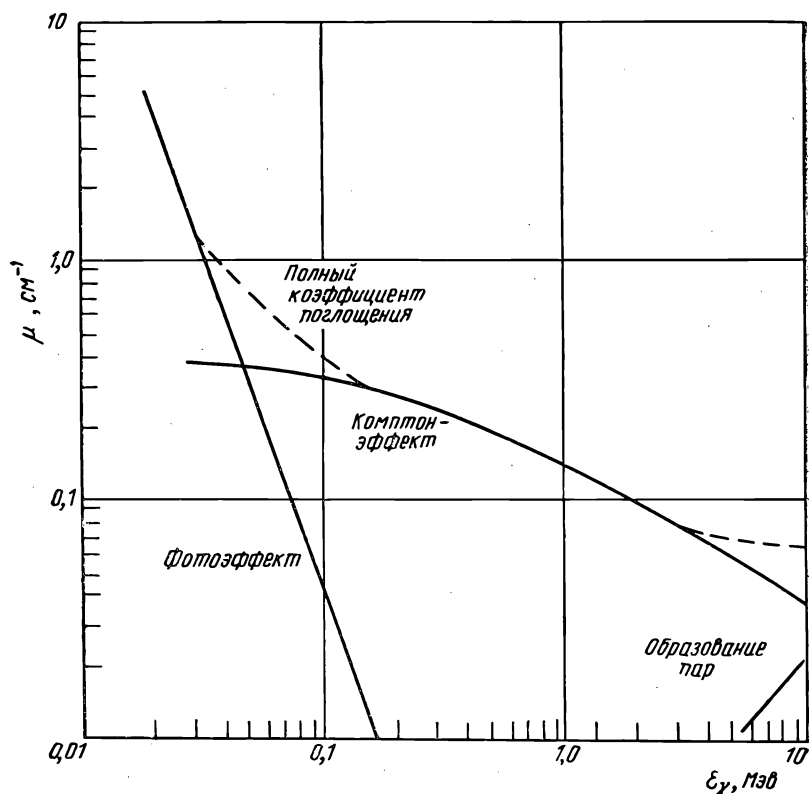


График 33. Зависимость полного коэффициента поглощения  $\mu$  и его отдельных составляющих от энергии  $\gamma$ -квантов в кремнии.

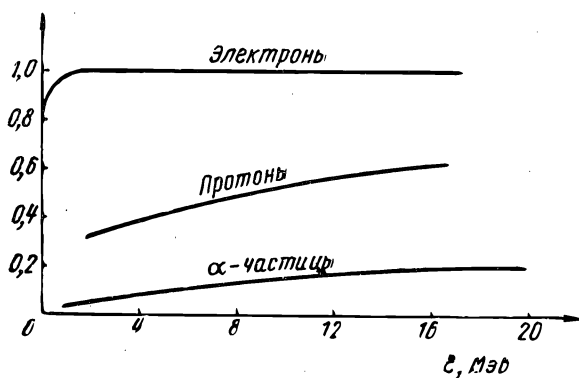


График 34. Зависимость величины относительной конверсионной эффективности для некоторых частиц в антрацене.

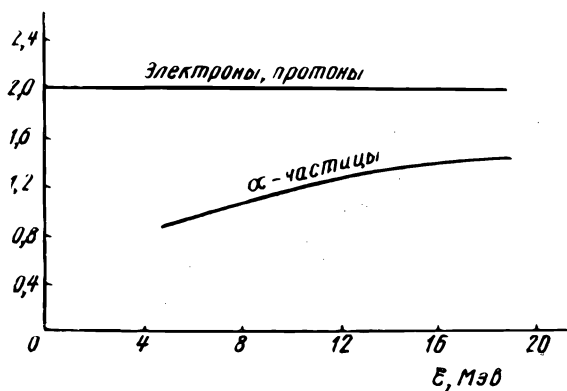


График 35. Зависимость величины относительной конверсионной эффективности для некоторых частиц в кристалле NaJ(Tl).

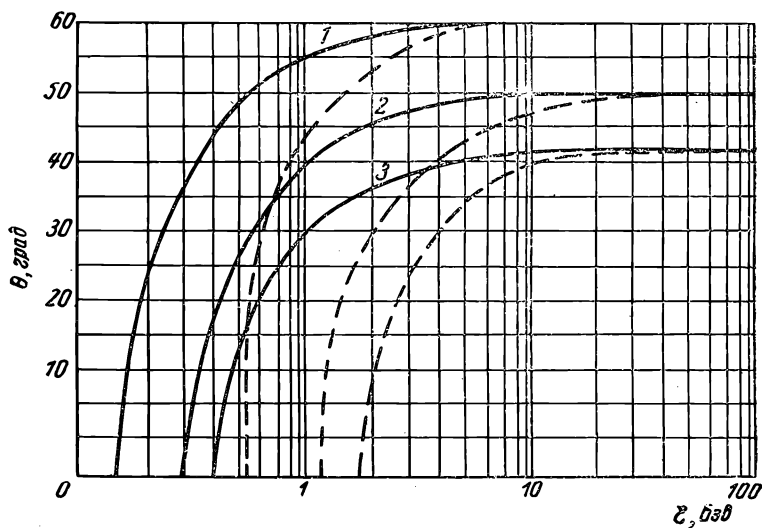


График 36. Зависимость угла черенковского излучения  $\theta$  от величины кинетической энергии протонов (сплошная линия) и  $\alpha$ -частиц (пунктирная линия) в разных средах: 1 — среда с  $n=2,0$ ; 2 — люцит, плексиглас ( $n=1,50$ ); 3 — вода ( $n=1,33$ ).



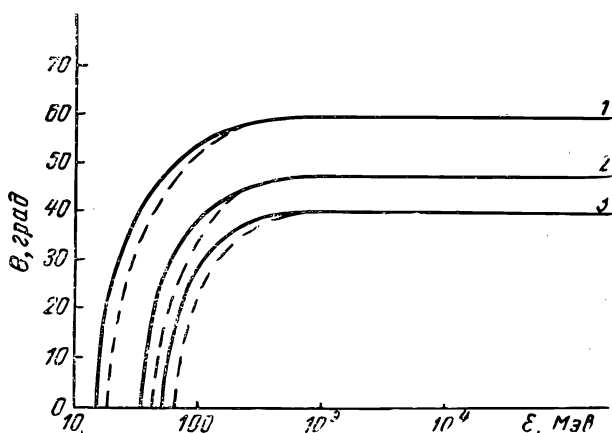


График 37. Зависимость угла черенковского излучения  $\theta$  от кинетической энергии  $\mu$ -мезона (сплошная линия) и  $\pi$ -мезона (пунктирная линия) в некоторых средах: 1 — среда с  $n=2$ ; 2 — люцит, плексиглас ( $n=1,50$ ); 3 — вода ( $n=1,33$ ).

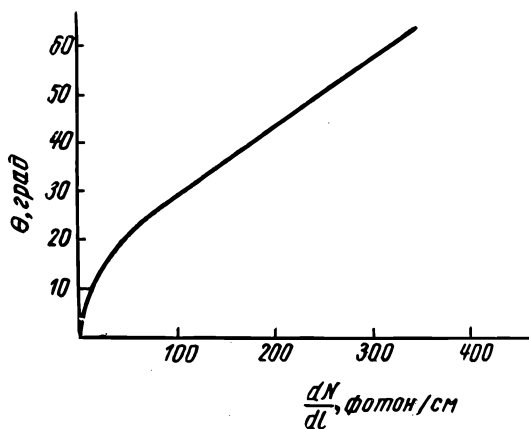


График 38. Зависимость выхода излучения  $\frac{dN}{dl}$  от угла черенковского излучения  $\theta$  (для всех однократно заряженных частиц и любых показателей преломления).

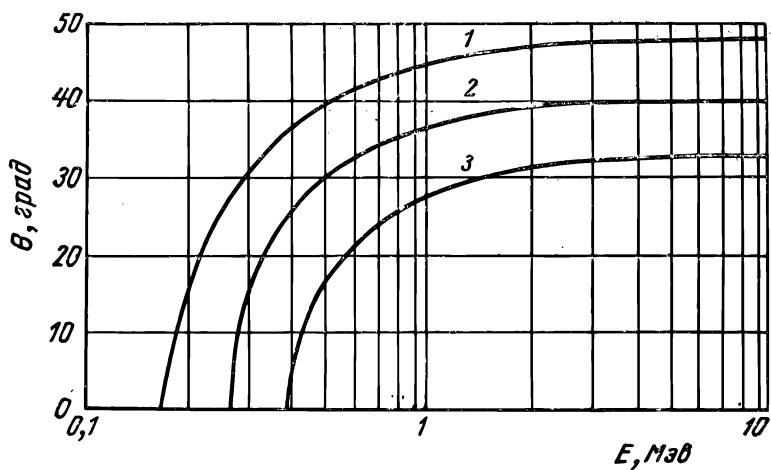


График 39. Зависимость угла черенковского излучения от кинетической энергии электронов в разных средах: 1 — люцит, плексиглас ( $n=1,50$ ); 2 — вода ( $n=1,33$ ); 3 — жидкий азот ( $n=1,205$ ).

---

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	5
Задачи . . . . .	13
Ответы и указания . . . . .	44
Приложение I. Таблицы . . . . .	51
Приложение II. Графики . . . . .	89

---

Редактор *Н. А. Светлова*

Техн. редактор *И. М. Суровенков*

Корректор *В. В. Новикова*

---

Д 121431	Сдано в набор 8/IV-69 г.	Подписано в печать 1/VIII-69 г.
	Объем 7,25 печ. л.	Бумага 60×90/16
		Заказ 384. Тираж 1500 экз.

---

Типография МИФИ. М. Пионерская, 12.

Цена 50 коп.