

## 2.4 Пробег

Тяжелые заряженные частицы взаимодействуют в основном с атомными электронами и поэтому мало отклоняются от направления своего первоначального движения. Вследствие этого, пробег тяжелой частицы  $R$  измеряют расстоянием по прямой от источника частиц до точки их остановки. Обычно пробег измеряется в единицах длины (м, см, мкм) или длины, умноженной на плотность ( $\text{г}/\text{см}^2$ ).

Длина пробега частицы зависит от ее заряда, массы, начальной энергии, а также от свойств среды, в которой частица движется. Пробег увеличивается с возрастанием начальной энергии массивные частицы обладают меньшими скоростями, чем легкие. Медленно движущиеся частицы взаимодействуют с атомами более эффективно и быстрее растрчивают имеющуюся у них энергию.

Пробеги протонов в алюминии приведены в **Табл. 1**, а пробеги альфа-частиц в разных материалах – в **Табл.2**.

**Табл.1. Пробеги протонов в алюминии**

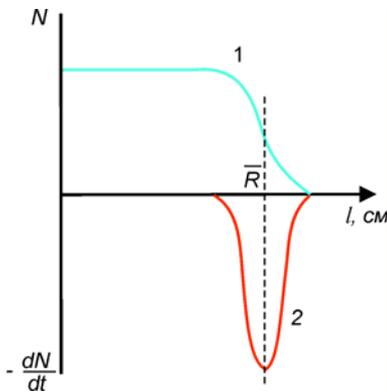
Энергия протонов, МэВ	1	3	5	10	20	40	100	1000
Пробег, см	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$7.8 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$6.2 \cdot 10^{-2}$	$2.7 \cdot 10^{-1}$	$7.0 \cdot 10^{-1}$	3.6	148
Пробег, мг/см <sup>2</sup>	3.45	21	50	170	560	$1.9 \cdot 10^3$	$9.8 \cdot 10^3$	$400 \cdot 10^3$

**Табл. 2. Пробеги альфа-частиц в воздухе, биологической ткани, алюминии.**

Энергия $\alpha$ -частиц, МэВ	4	6	8	10
воздух, см	2.5	4.6	7.4	10.6
Биологическая ткань, мкм	31	56	96	130
алюминий, мкм	16	30	48	69

Остановимся несколько подробнее на пробеге  $\alpha$ -частиц в веществе.

Заряженная частица проходит в веществе некоторое расстояние, прежде чем она потеряет всю свою кинетическую энергию. Численное значение проникающей способности  $\alpha$ -излучения соответствует пробегу  $\alpha$ - частицы. Пробегом  $\alpha$ -частицы называют длину траекторий (трека), по которой двигается частица в веществе с момента входа в вещество до полной стабилизации. Величина пробега определяется удельными потерями энергии. Чем больше плотность атомных электронов и заряд частицы, тем выше эти потери и тем меньше пробег частицы в веществе. Тяжелые заряженные частицы, взаимодействующие в основном с атомными электронами, мало отклоняются от направления своего первоначального движения – треки прямолинейны. Поэтому пробег тяжелой частицы измеряют расстоянием по прямой от источника частиц до точки ее остановки.



**Рис.5.** Зависимость числа  $\alpha$ -частиц от расстояния до источника. 1 – число  $\alpha$ -частиц на расстоянии  $l$ ; 2 –  $-dN/dl$  – число  $\alpha$ - частиц с пробегом  $l$ ;  $R$  – средний пробег  $\alpha$ -частиц.

$\alpha$ - излучение характеризуется малой проникающей способностью и сильным ионизирующим действием.  $\alpha$  – частицы, обладающие значительно большей массой, при столкновениях с электронами атомных оболочек испытывают очень небольшие отклонения от своего первоначального направления и движутся почти прямолинейно. Пробеги  $\alpha$  – частиц в веществе очень малы. Например, у  $\alpha$  – частицы с энергией 4 МэВ длина пробега в воздухе примерно 2,5 см, в воде или в мягких тканях животных и человека – сотые доли миллиметра.

Распределение числа  $\alpha$ - частиц по толщине слоя поглощающего газа представлено на **Рис.5**. В результате неоднородности поглощающего энергию  $\alpha$ -частиц вещества, не все  $\alpha$ -частицы с равной начальной энергией имеют одинаковый пробег, поэтому более точное определение величины пробега  $\alpha$ -частиц производится дифференцированием кривой 1, показывающей распределение числа стабилизировавшихся  $\alpha$ -частиц по длине пути. Абсцисса максимума дифференциальной кривой 2 дает значение среднего пробега  $\alpha$ -частиц в веществе.

Параметр столкновения  $\alpha$ - частиц с электронами имеет вероятностный характер и отсюда пробеги  $\alpha$  - частиц в веществе имеют некоторый разброс. Незначительная часть  $\alpha$  - частиц проникает дальше других от источника.

Измеряя пробег  $\alpha$ -частицы в веществе, например в воздухе, можно определить ее энергию. Средний пробег  $R_\alpha$  моноэнергетических  $\alpha$  - частиц обычно рассчитывают по эмпирическим формулам. В воздухе при нормальных условиях:

$$R_\alpha = a * E_\alpha^m \quad (21)$$

где  $R_\alpha$  - пробег в см;  $E_\alpha$  - кинетическая энергия  $\alpha$  - частиц в Мэв,  $m$  - показатель степени.  
 Для  $\alpha$  - частиц, испускаемых естественными  $\alpha$  - излучателями ( $4 < E_\alpha < 9$  Мэв),  $a = 0.318$ ,  $m = 1.5$ . Для  $\alpha$  - частиц с более высокими энергиями  $E_\alpha \leq 200$  (Мэв)  $a = 0.148$ ,  $n = 1.8$ . Так,  $\alpha$  - частицы с энергиями  $E_\alpha = 5$  Мэв пробегают в воздухе расстояние 3.51 см, а с энергией  $E_\alpha = 30$  Мэв - 68 см. Отношение линейных пробегов двух типов частиц, начинающих движение в воздухе с одинаковыми скоростями, пропорционально отношению удельных потерь энергии частиц:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{m_1}{m_2} * \left( \frac{Z_2}{Z_1} \right)^2 \quad (22)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  - это массы частиц.

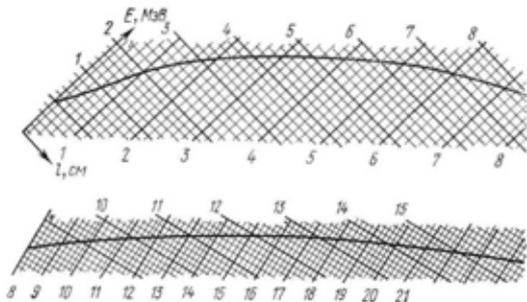
Часто вместо линейного пробега используют массовый пробег **заряженной частицы**  $R_m$ , выражаемый в граммах на квадратный сантиметр ( $г/см^2$ ). Численно он равен массе вещества, заключенного в цилиндре, высота которого равна линейному пробегу частицы  $R$  в сантиметрах, а площадь поперечного сечения -  $1 см^2$ .

$$R_m = \rho R \quad (23)$$

где  $\rho$  - плотность вещества в  $г/см^3$ .

**Массовый пробег заряженной частицы** удобен тем, что он мало зависит от состава вещества. Удельная потеря энергии пропорциональна плотности атомных электронов  $n_e = Nz$  ( $N$  - плотность атомов). Поэтому линейный пробег пропорционален  $Nz$ . По формуле  $\left( N = \frac{\rho}{\mu} * N_A \right)$  плотность вещества пропорциональна произведению плотности атомов на атомную массу:  $\rho \sim NA$ . Массовый пробег  $R_m = \rho R \approx \frac{NA}{Nz} = \frac{A}{z}$ . Так как отношение  $A/Z$  для многих веществ изменяется мало, то и массовый пробег для этих веществ почти постоянен.

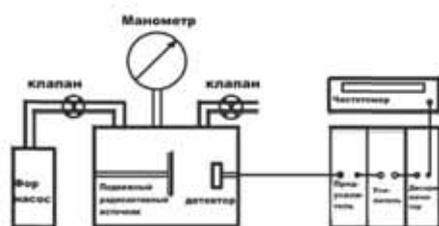
Для определения энергии  $\alpha$ -частицы по ее пробегу часто используются номограммы типа представленной на **Рис.6**



**Рис.6.** Связь между энергией и средним пробегом для  $\alpha$ -частицы в воздухе при давлении 760 мм рт. ст. и  $15^\circ C$

подложку из стали, в углубление которой зафиксирован радиоактивный препарат. С помощью механизма перемещения расстояние между детектором и источником можно изменять от 2 до 50 мм. Давление газа в камере можно изменять с помощью форвакуумного насоса. Сигнал с детектора подается сначала на предусилитель, затем на формирователь-усилитель, дискриминатор и пересчетное устройство - частотомер.

Если исследовать прохождение параллельного пучка альфа-частиц в зависимости от толщины газа (воздуха), то оказывается, что число частиц  $N$  в пучке остается приблизительно постоянным вплоть до определенного расстояния, а затем падает, но падает не сразу до нуля, а с некоторым наклоном (см. **Рис.5**). Если эту кривую продифференцировать и построить величину  $dN/dx$  в зависимости от толщины слоя  $x$ , то получится кривая 2. Эта кривая имеет резкий минимум при  $x = R$ , показывающий, что подавляющее большинство альфа-частиц имеет определенный пробег с некоторым разбросом в ту и другую сторону. Величина  $R$  называется средним пробегом, а разброс пробега - страгглинг.



**Рис.7.** Схема экспериментальной установки для определения длины пробега  $\alpha$ -частиц в газе

Страгглинг обусловлен флуктуациями ионизационных потерь. Если среднее число ионов, образуемое альфа-частицей при ее движении равно  $N_i$ , то возможное отклонение от этого числа, согласно статистическому закону, равно  $N_i$ . Флуктуация  $N_i$  составляет доли процента, тогда как флуктуация пробега значительно больше. Это объясняется тем, что при прохождении через вещество к альфа-частице могут примкнуть один или два электрона. Таким образом, на всем пути частица имеет разный заряд, что, естественно, вызывает дополнительные флуктуации в ионизации и, следовательно, в пробеге.