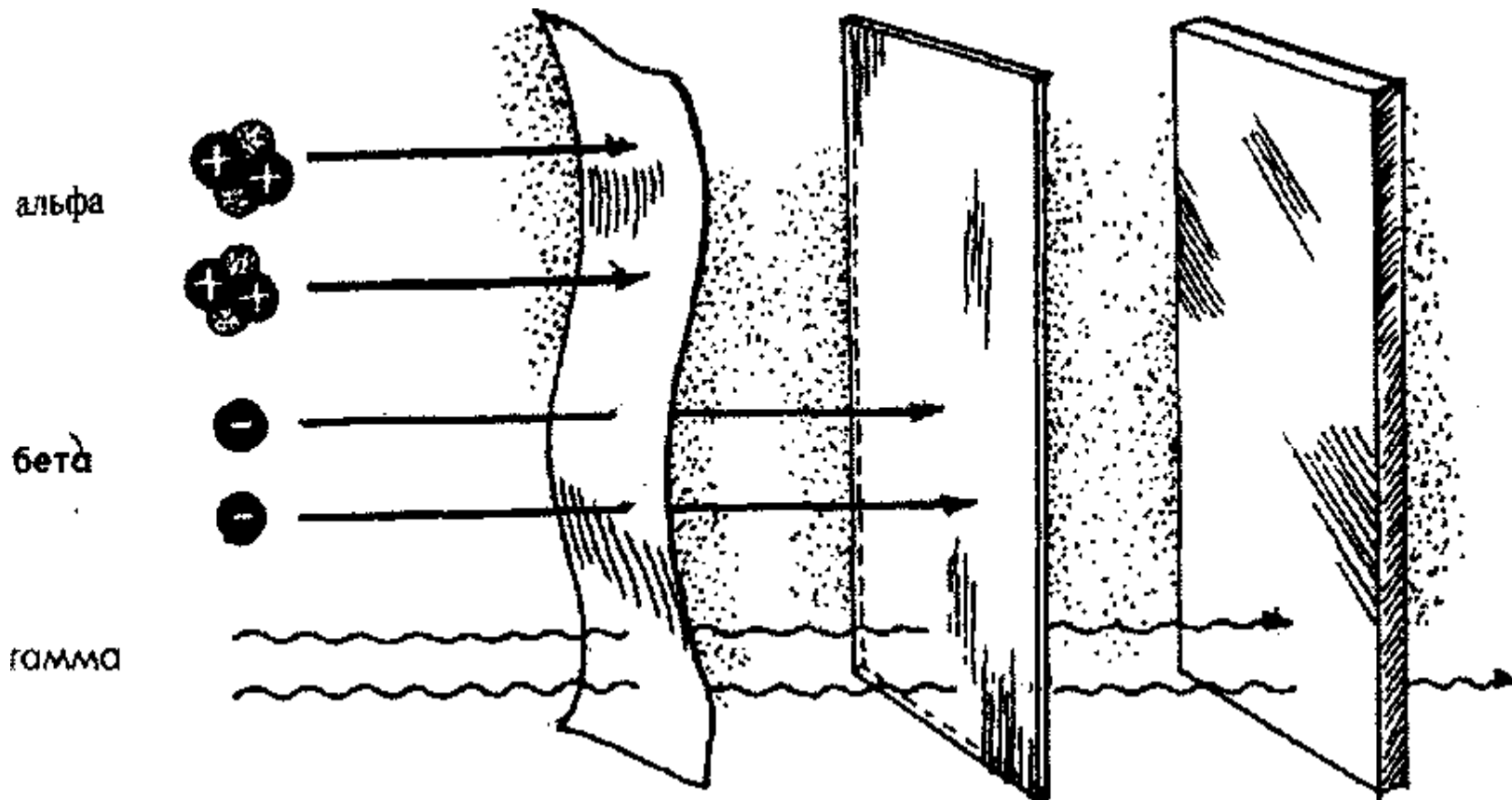


4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ



По роду взаимодействия с веществом радиоактивное излучение можно разделить на три группы:

- 1. Заряженные частицы: α -излучение, β -излучение, протоны, дейтроны, различные ионы.**
- 2. Нейтральные частицы: нейтроны, нейтрино.**
- 3. Электромагнитное излучение: рентгеновское, γ -излучение.**

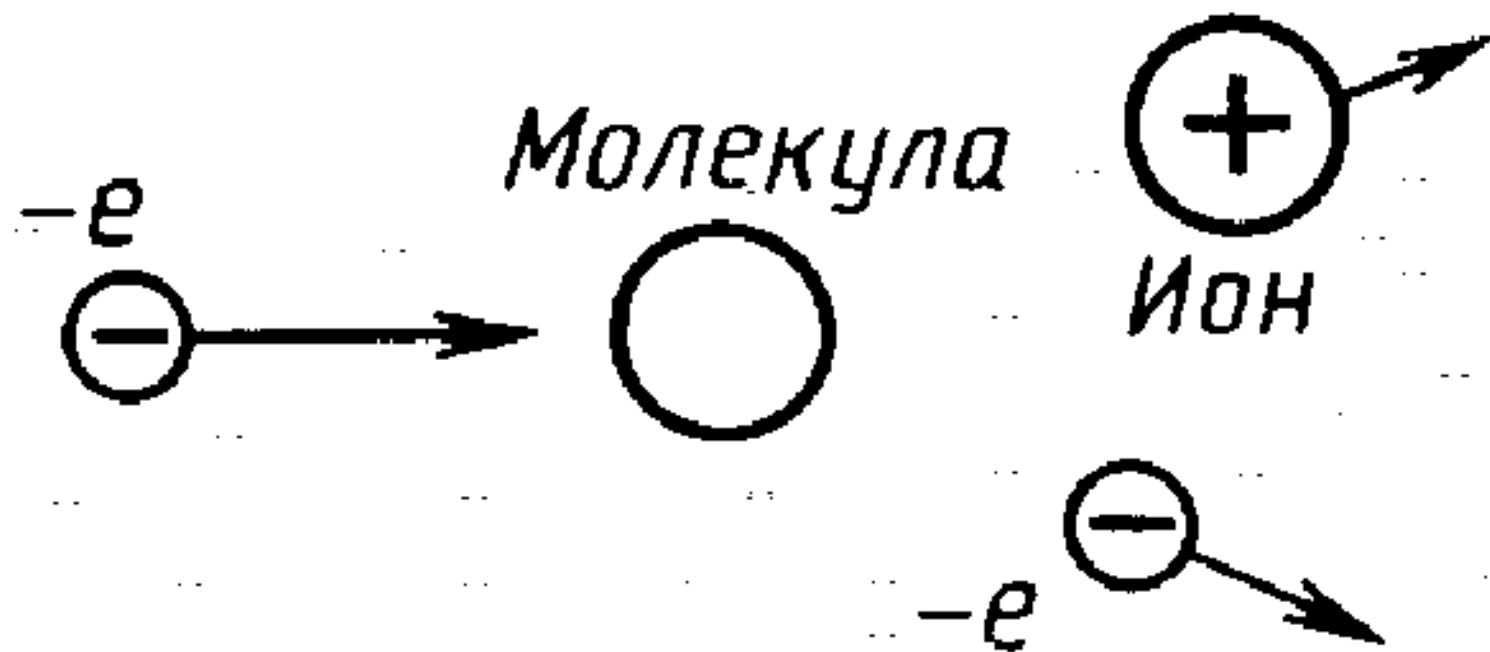
4.1. Взаимодействие заряженных частиц с веществом

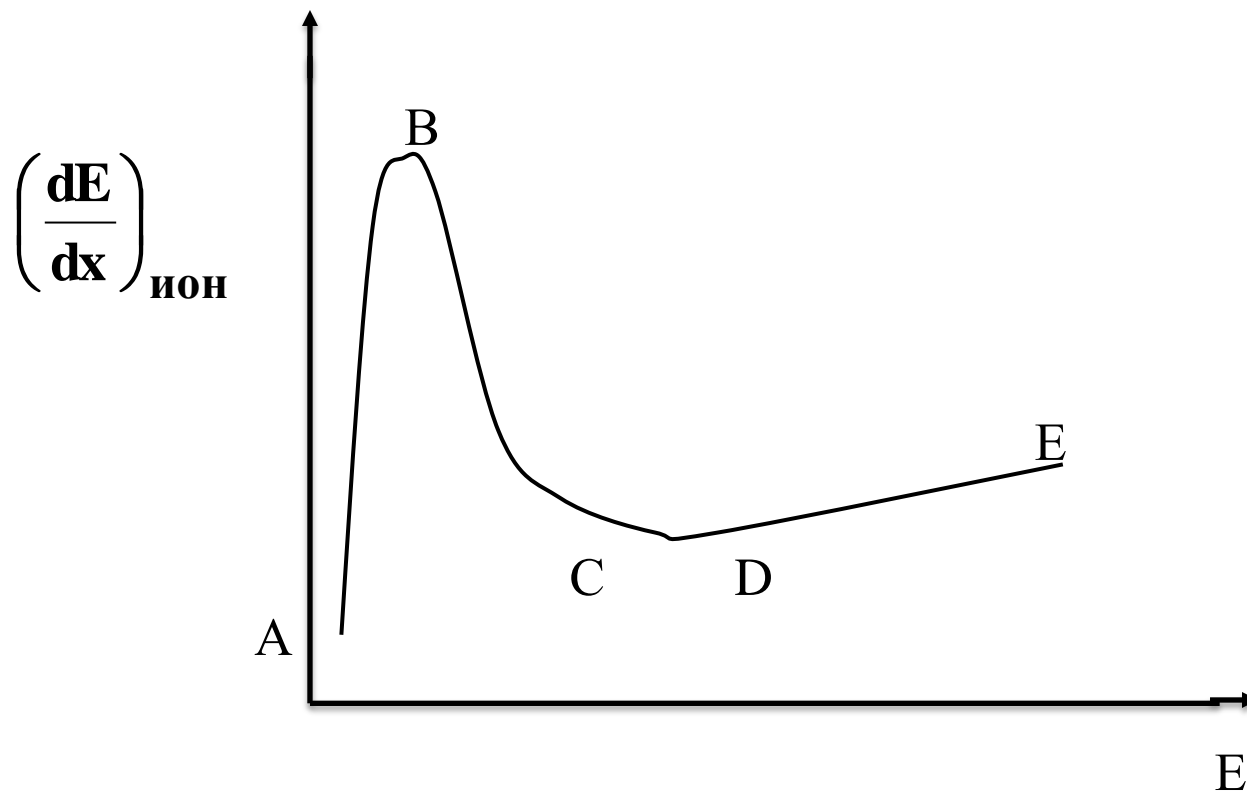
Вещество состоит из положительно заряженных ядер и отрицательных электронов. Поток заряженных частиц теряет энергию за счет разных физических процессов.

4.1.1. Ионизационное торможение

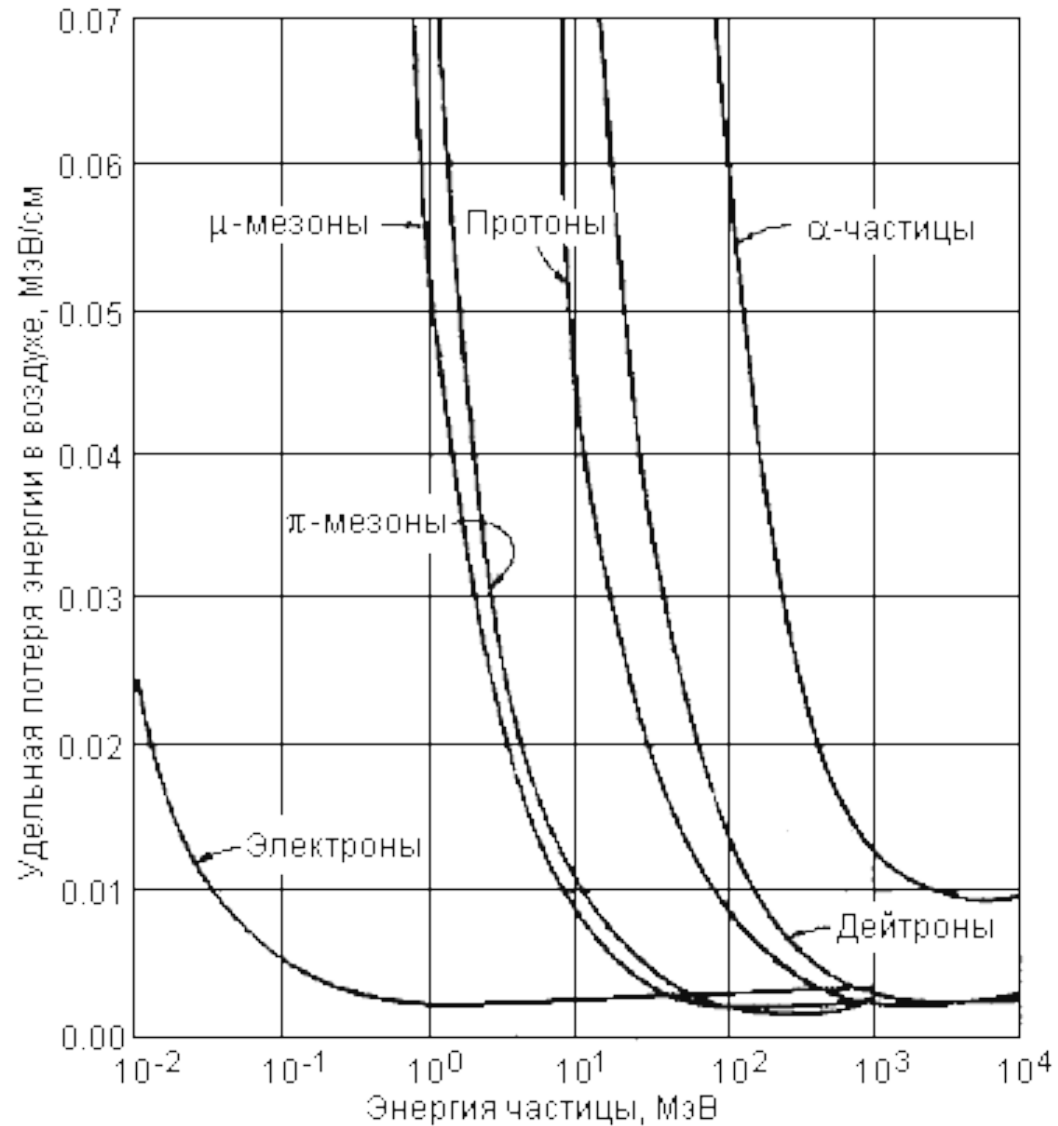
Кинетическая энергия падающей заряженной частицы тратится на возбуждение и ионизацию атомов среды.

$$-\left[\frac{dE}{dx}\right]_{\text{ион}} = B \frac{4\pi \cdot e^4 \cdot Z^2}{m_e \cdot v^2} \cdot Z_a \cdot N_a$$

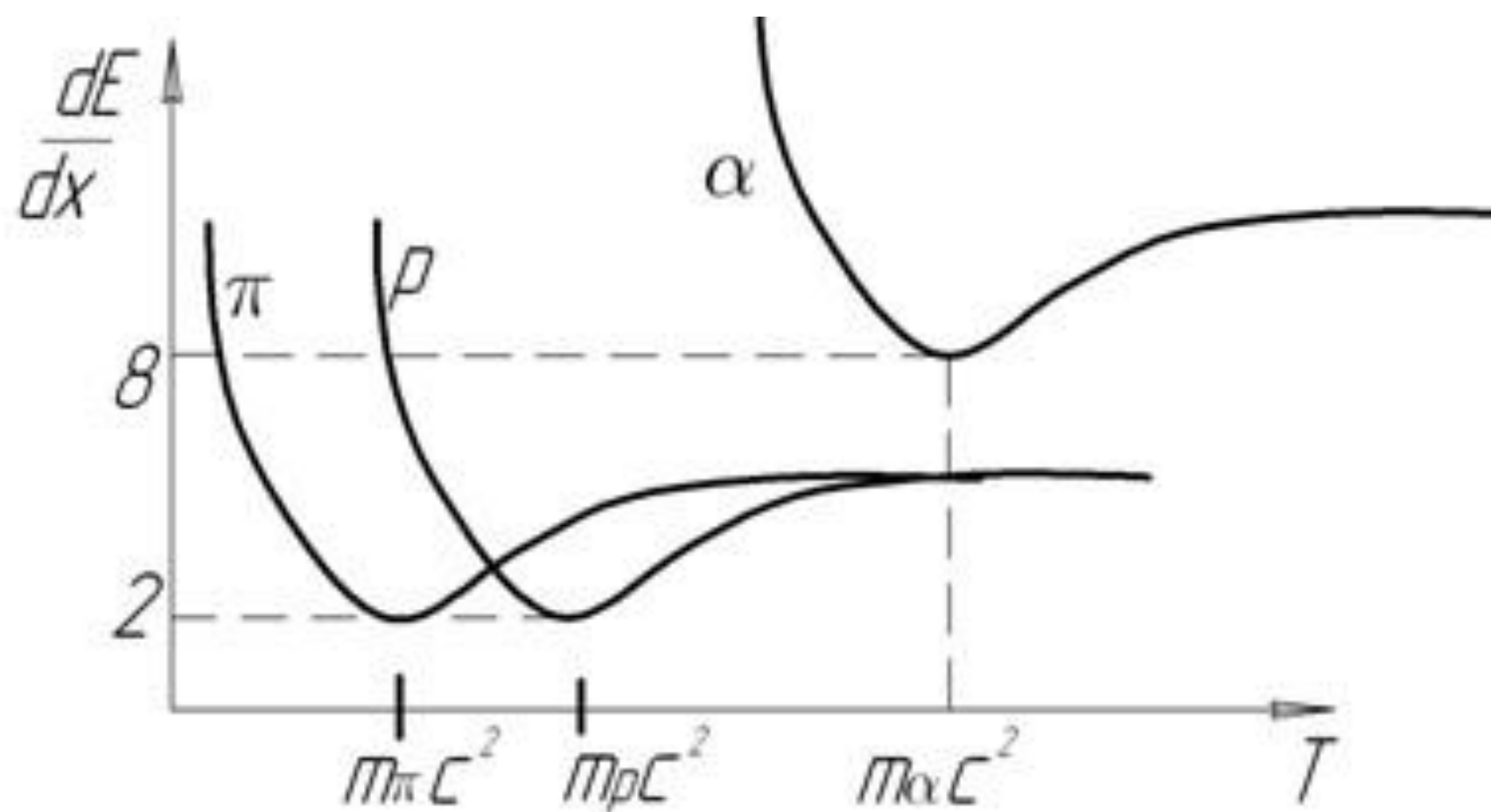




Зависимость удельных потерь энергии от энергии E налетающей частицы



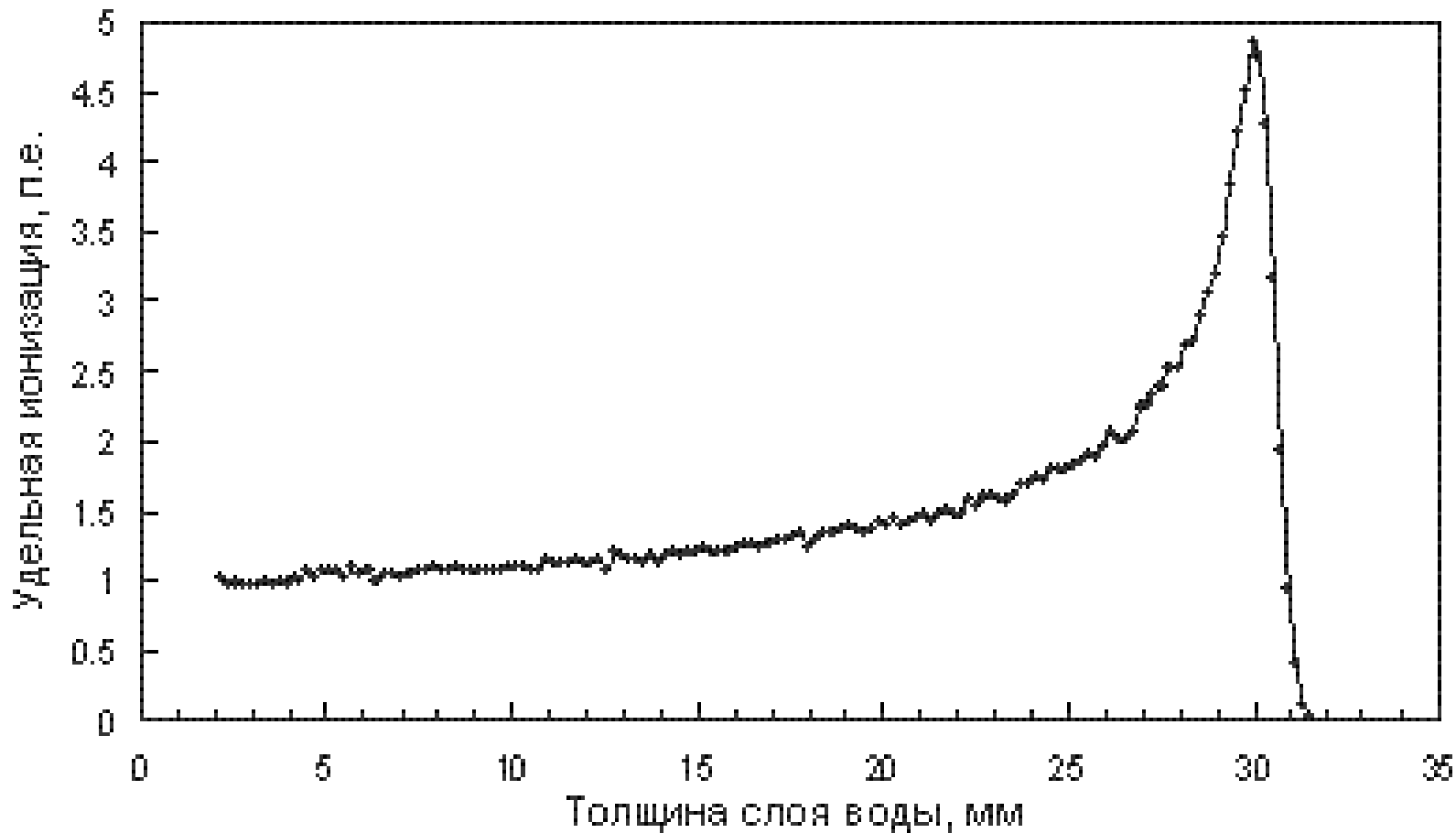
Зависимость удельных потерь энергии на ионизацию воздуха от энергии разного рода частиц



Альфа-частица с энергией несколько МэВ на пути в 1 см в воздухе создает 30000 пар ионов. Электрон такой же энергии – всего несколько десятков пар ионов.

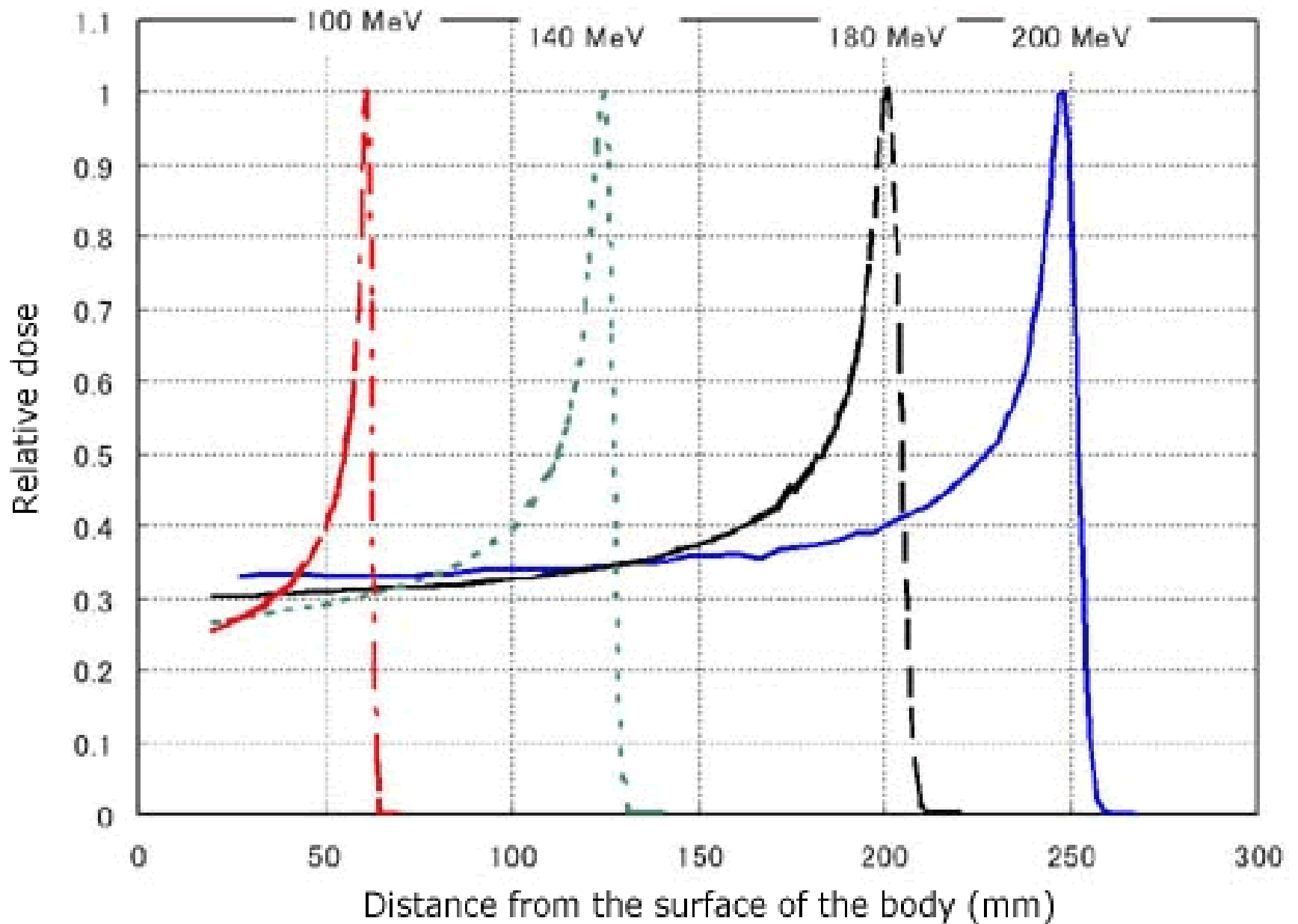
4.1.2. Длина пробега

Длина пробега или просто пробег R – это толщина слоя вещества, которую может пройти частица до полной остановки, если направление движения частицы было перпендикулярно поверхности вещества.



Зависимость удельных потерь альфа-частицы от её пробега.

Максимальные потери в конце пути перед остановкой, возможность производить легирование разной глубины.



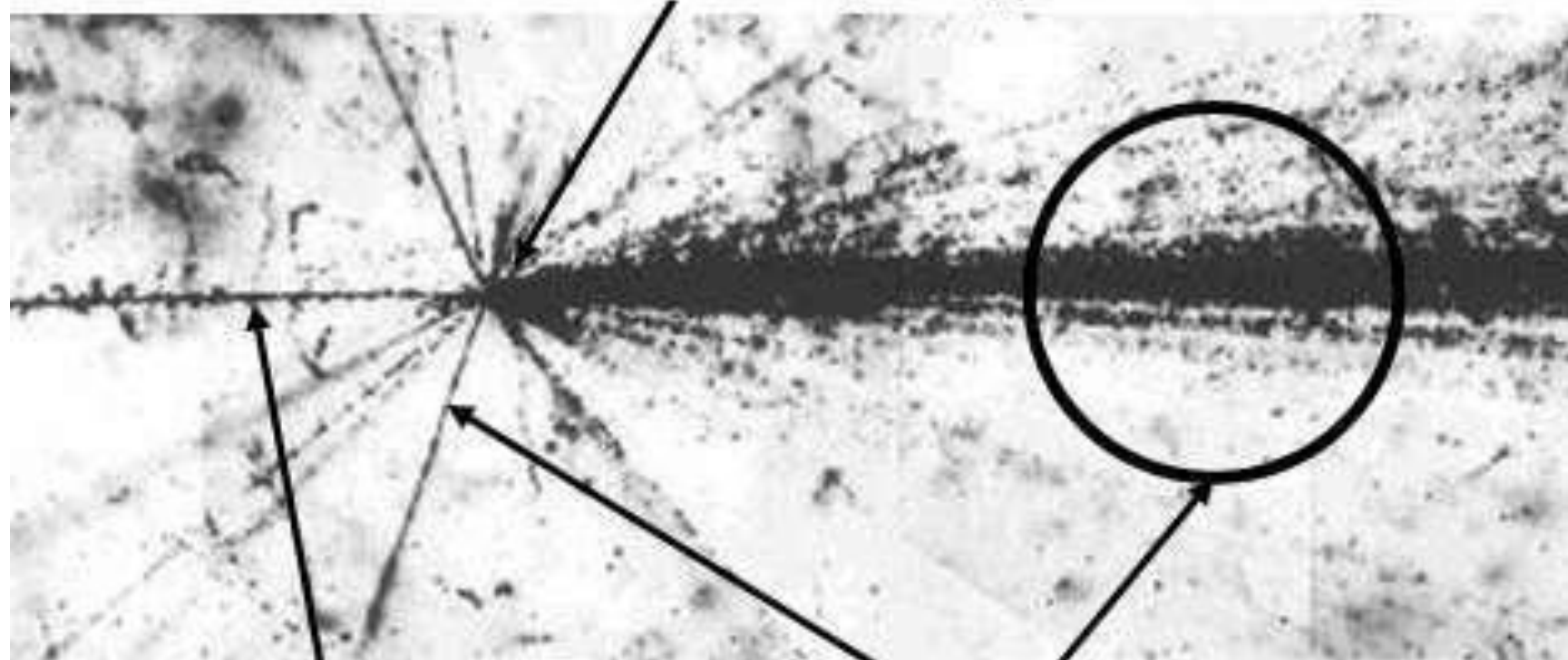
Зависимость пробега заряженных частиц от их энергии

$$**R = \alpha \cdot E^{3/2}**$$

На практике и в справочной литературе длину пробега часто выражают в иных единицах измерения – г/см², что учитывает плотность в-ва.

$$**R\left(\text{г/см}^2\right) = R(\text{см}) \cdot \rho\left(\text{г/см}^2\right)**$$

**МЕСТО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПЕРВИЧНОЙ ЧАСТИЦЫ С ЯДРОМ**



ПЕРВИЧНАЯ ЧАСТИЦА

ВТОРИЧНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Е, МэВ	Воздух, см	Биологическая ткань, мкм	Алюминий, мкм
4	2.5	31	16
5	3.5	43	23
6	4.6	56	30
7	5.9	72	38
8	7.4	91	48
9	8.9	110	58
10	10.6	130	69

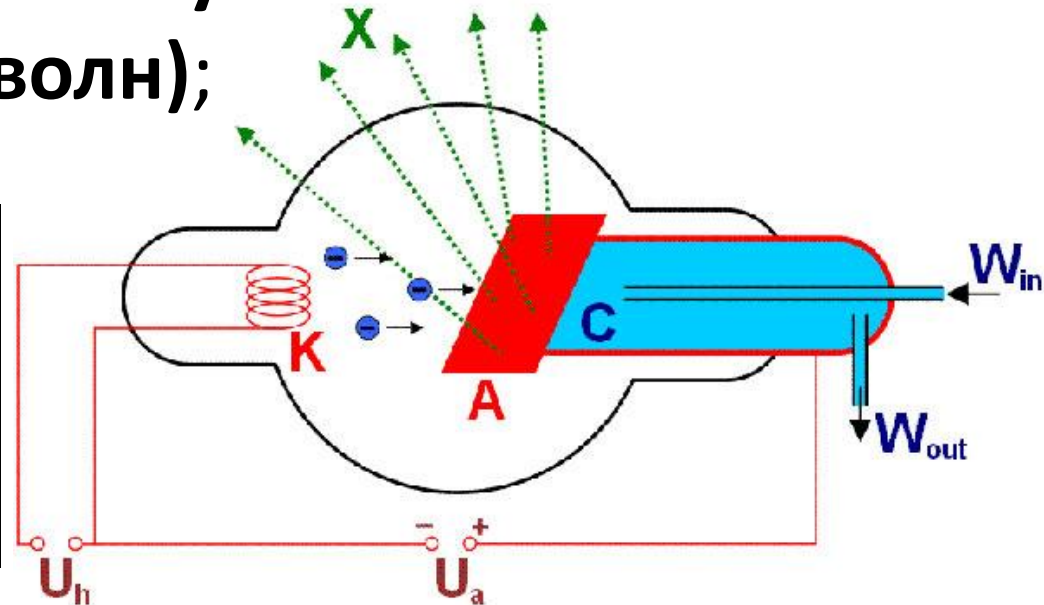
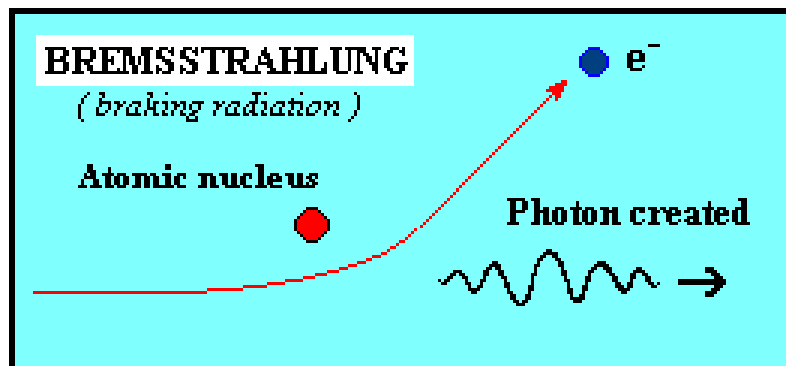
Пробег альфа-частиц в некоторых веществах.

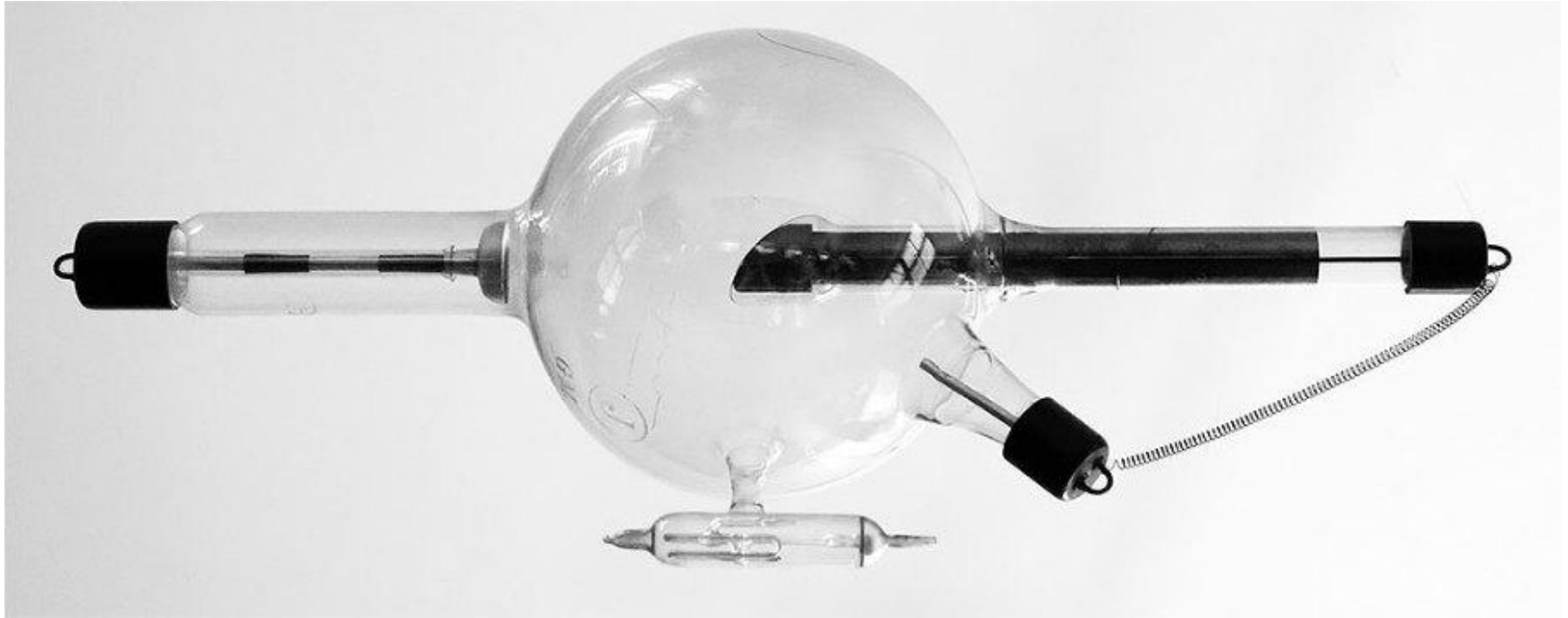
Е, МэВ	Возду х, см	Алюмин ий, мм	Железо , мм	Медь, мм	Свине ц, мм
0.01	0.22	1.30	5.43	5.11	7.27
0.10	12.61	7.0	2.69	2.48	2.73
1.00	379.7	2.03	0.76	0.70	0.67
2.00	835.3	1.67	1.50	1.57	1.38
4.00	1709.2	9.19	3.34	3.00	2.58
7.00	2100.2	15.7	5.57	4.98	4.02
10.00	4013.9	21.6	7.55	6.73	5.18

Пробег электронов в некоторых веществах

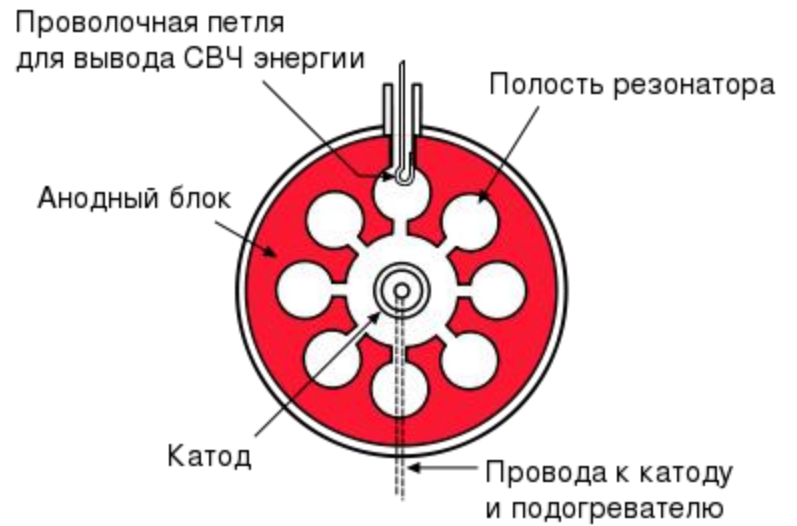
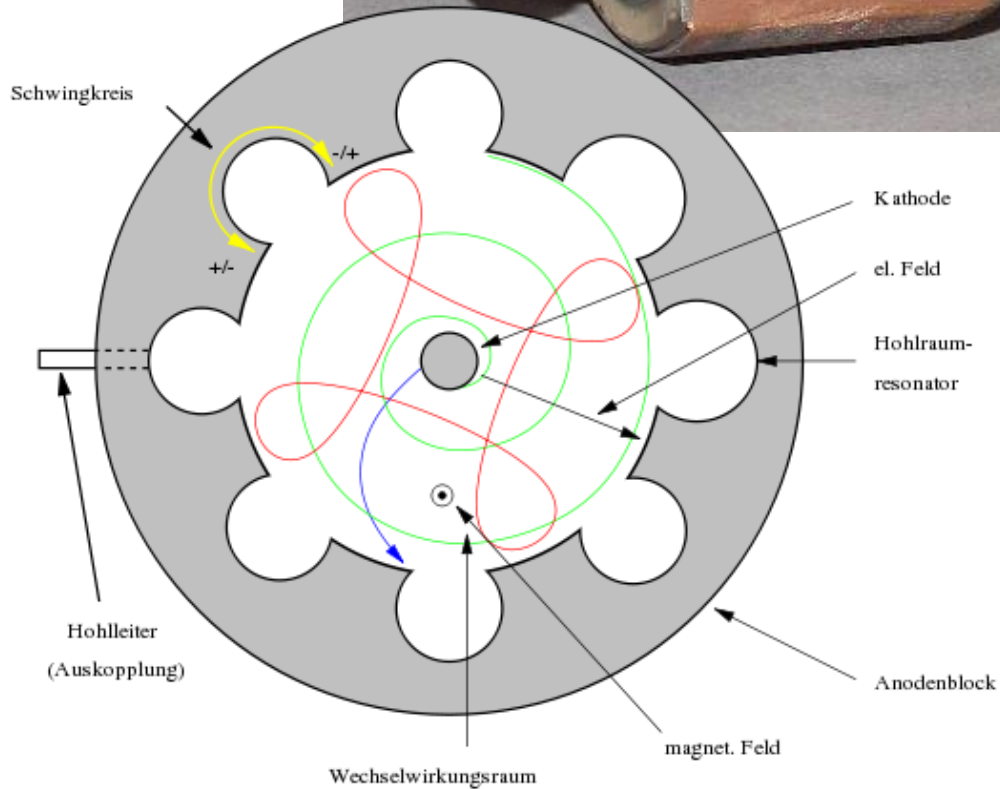
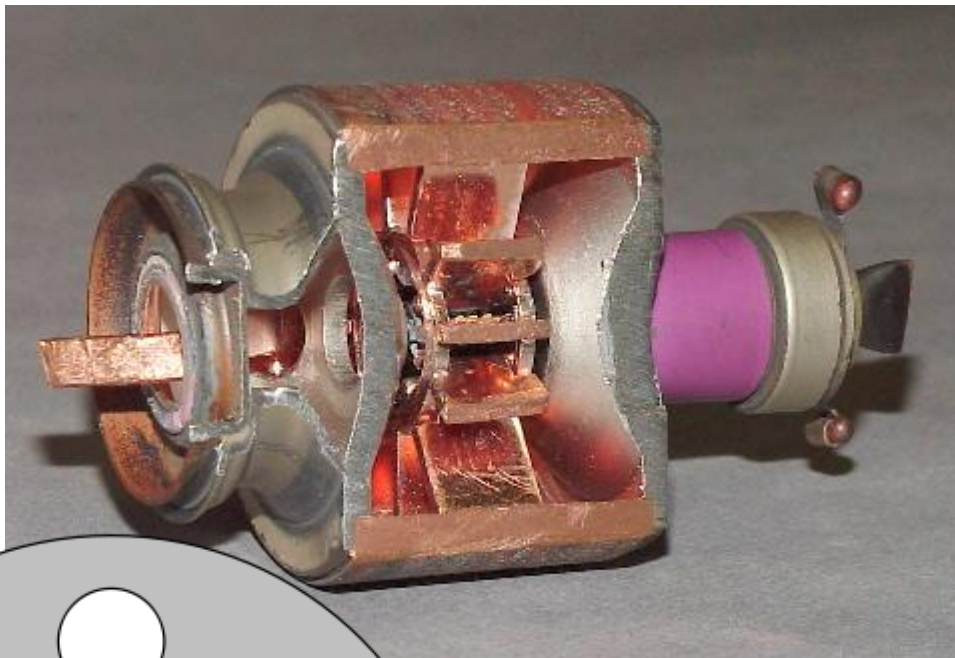
4.1.3. Другие виды потерь заряженных частиц

- за счет *радиационного торможения* (в этом случае движущаяся с отрицательным ускорением частица теряет энергию вследствие излучения ею электромагнитных волн);





Рентгеновская трубка – источник жесткого тормозного ЭМИ (рентгена).



Магнетрон СВЧ печи.

- за счет *упругого рассеяния* на ядрах при кулоновском взаимодействии с ними;
- может произойти *ядерная реакция в ядре*, если оно захватит частицу;
- может возникнуть *излучение Вавилова – Черенкова*.

Однако эти виды взаимодействия менее вероятны, чем ионизационное торможение.

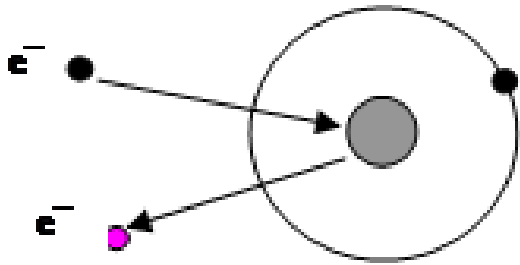


Рис. 7. Упругое рассеяние бета-частицы на ядрах атома

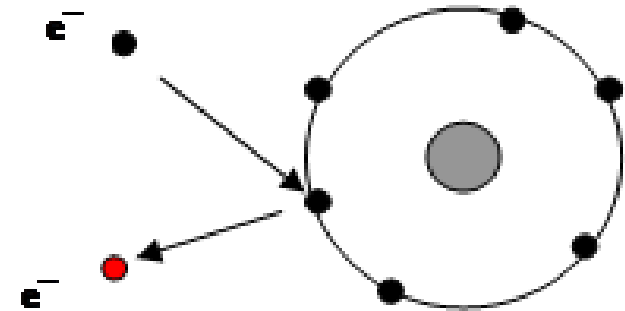


Рис. 8. Упругое рассеяние бета-частицы на электронах атома

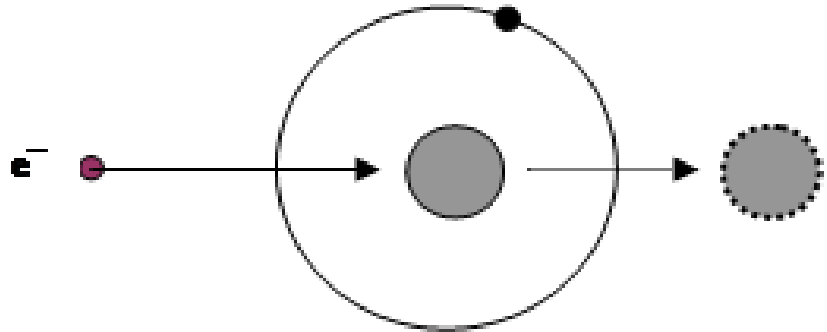
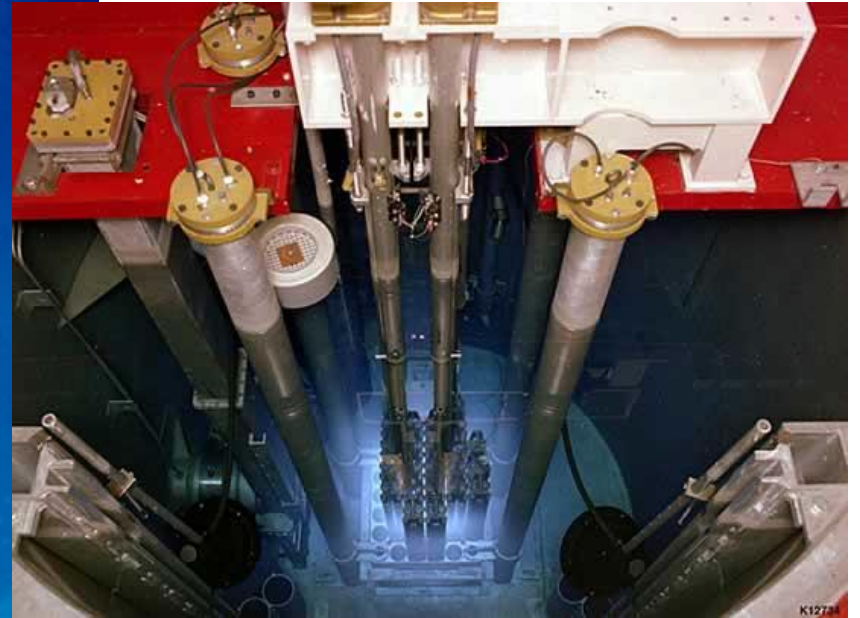
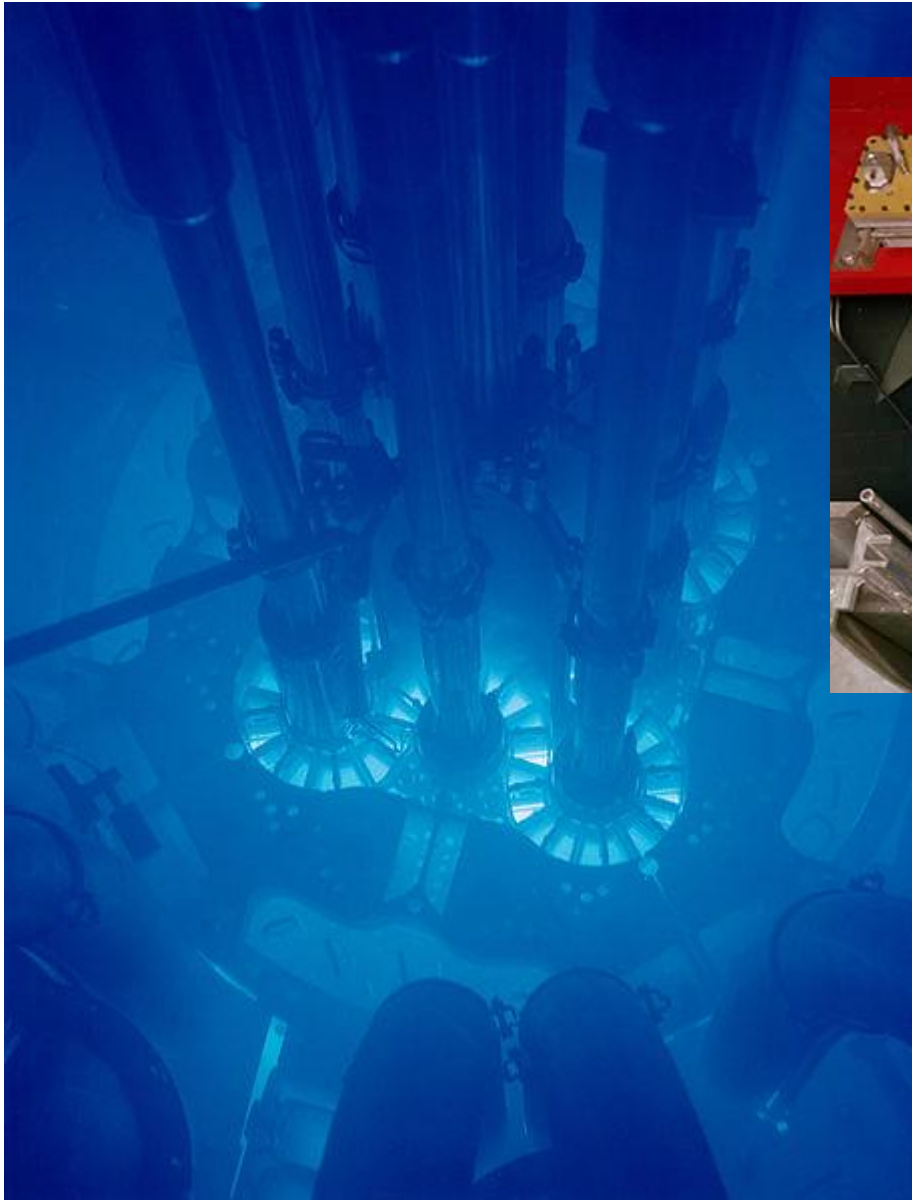
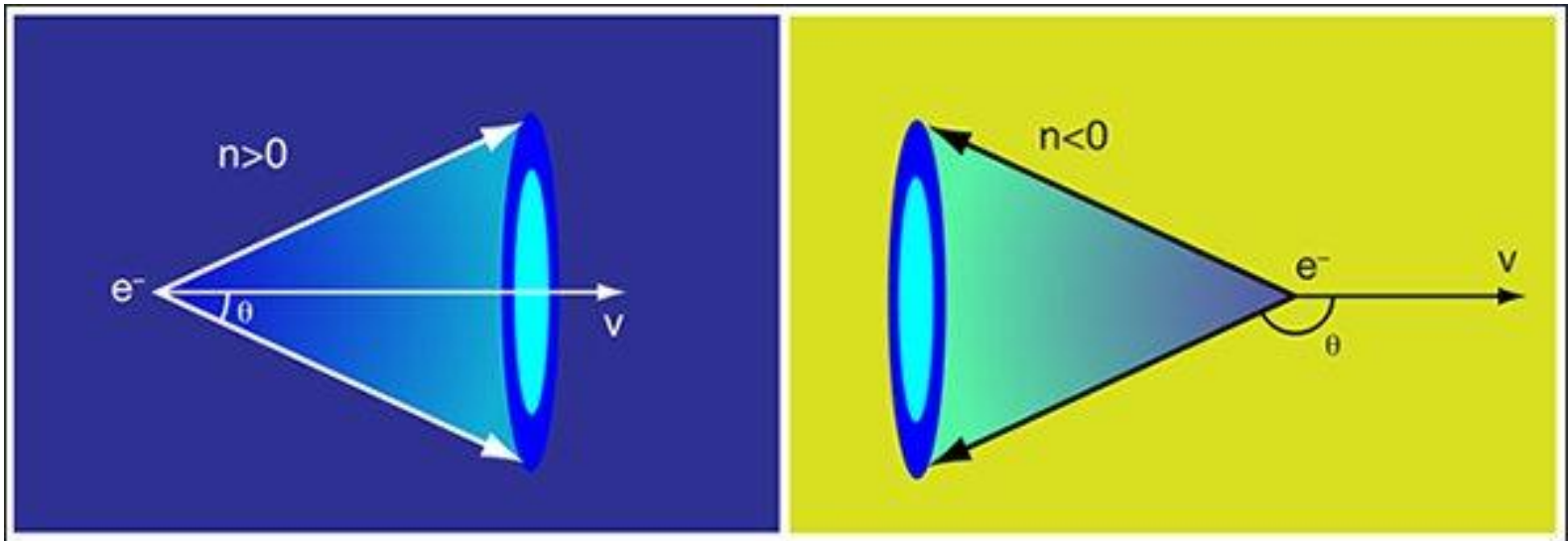
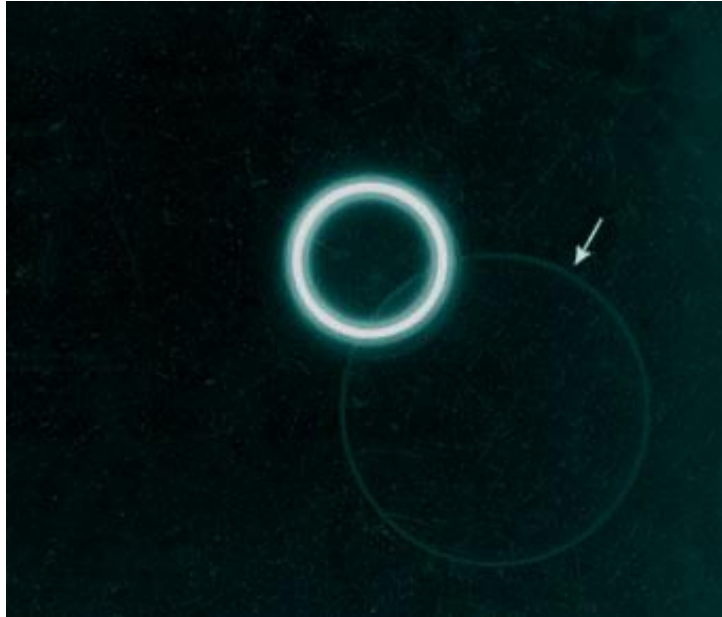


Рис. 9. Вариант смещения ядра атома с кристаллической решетки





4.2. Взаимодействие гамма-излучения с веществом

$$E_{\gamma} = h \cdot \nu = h \cdot (c/\lambda) \quad h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$$

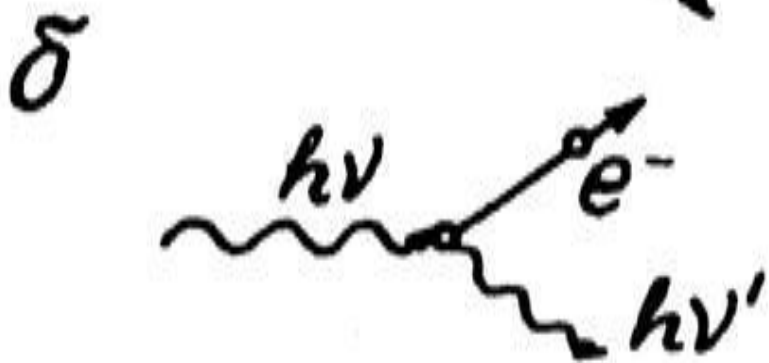
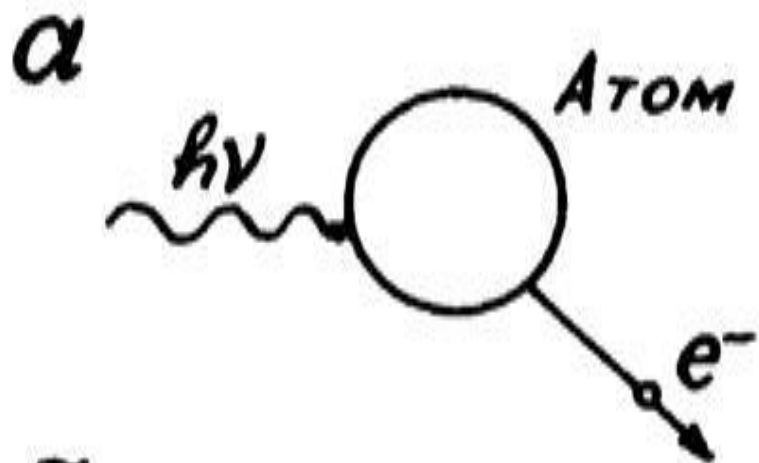
Основными видами взаимодействия γ -излучения с веществом являются:

а) фотоэффект,

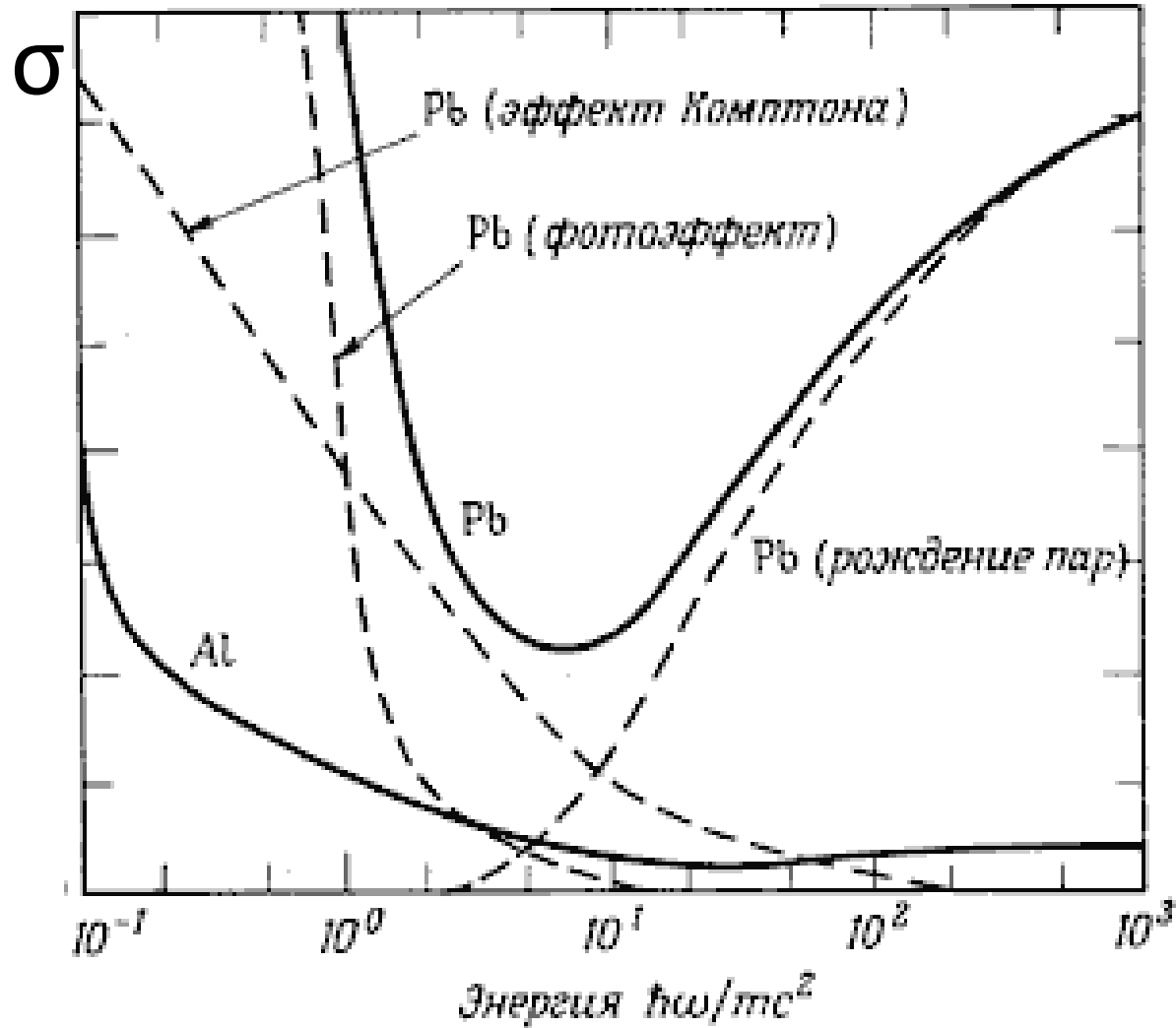
б) комптон-эффект,

в) рождение электронно-позитронных пар.

- Явление ***фотоэффекта*** состоит в том, что энергия фотона целиком поглощается атомом, а один из электронов оболочки выбрасывается за пределы атома.
- При ***комpton-эффекте*** происходит рассеяние γ -лучей электронами вещества. Гамма-квант отдает часть своей энергии электрону, а значит длина волны этого кванта увеличивается.
- Эффект ***рождения электронно-позитронных пар*** возможен при достаточно большой энергии гамма-кванта в поле ядра в-ва.



$$\sigma = \sigma_{\text{фот}} + \sigma_{\text{к}} + \sigma_{\text{пар}}$$



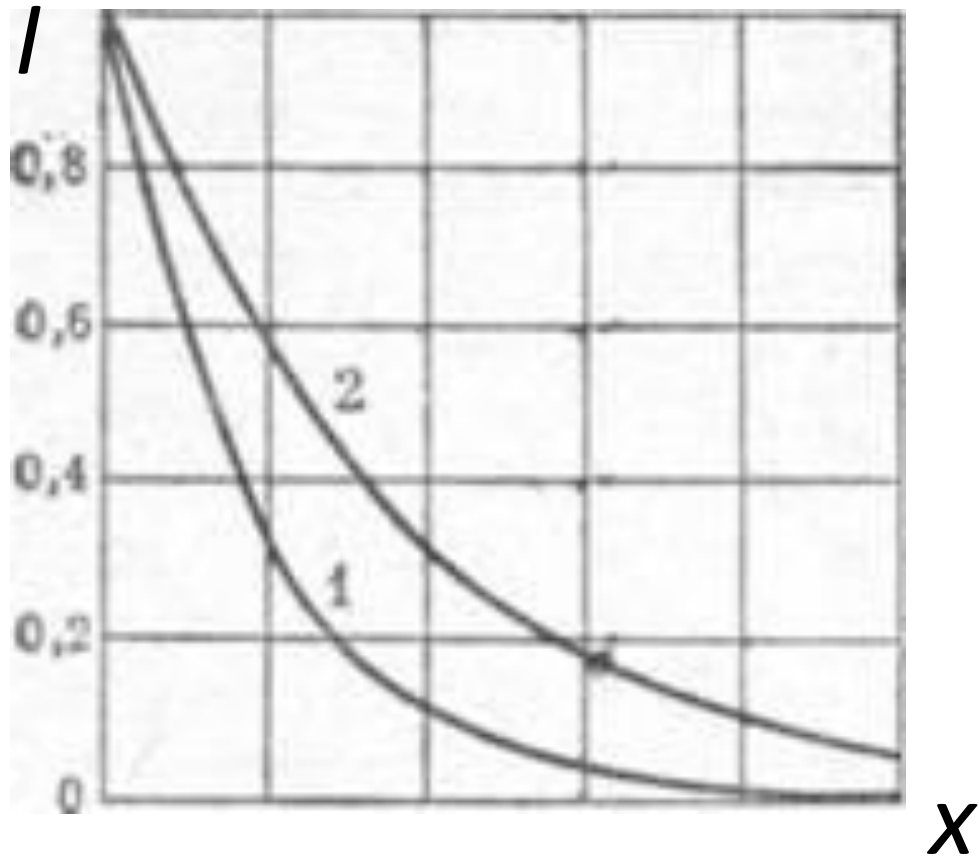
Электромагнитное излучение при прохождении через вещество поглощается им.

Интенсивность уменьшается экспоненциально:

$$I = I_0 \cdot e^{-\tau \cdot X}$$

Линейный коэффициент поглощения можно представить в виде суммы

$$\tau = (\tau_{\text{ф}} + \tau_{\text{ком}} + \tau_{\text{пар}})$$



$$\rho_1 > \rho_2$$

Линейные коэффициенты поглощения γ -лучей для некоторых веществ в зависимости от энергии квантов

Вещество	ρ , г/см ³	1 МэВ	3 МэВ	6 МэВ
Сосна	0.67	0.0452	0.0253	0.0175
Ткани человека	1.00	0.0699	0.0393	0.0274
Песок	2.20	0.1400	0.0825	0.0578
Бетон портланд	2.40	0.1540	0.0878	0.0646
Бетон баритовый	3.50	0.2130	0.1270	0.1100
Стекло свинцовое	6.40	0.4390	0.2570	0.2570
Сталь (1 % С)	7.83	0.4600	0.2760	0.2340
Висмут	9.80	0.7000	0.4090	0.4400
Свинец	11.35	0.7700	0.4700	0.4900



4.3. Взаимодействие нейтронов с веществом

Нейтроны *непосредственно не могут вызвать ни ионизации, ни возбуждения атомов* вещества, поскольку они нейтральны.

Нейтроны взаимодействует с веществом только когда каждый нейтрон приближается к ядру и в действие могут вступить ядерные силы сильного взаимодействия.

Два класса взаимодействия нейтрона с ядрами, в зависимости от того, попадет он непосредственно в ядро или нет:

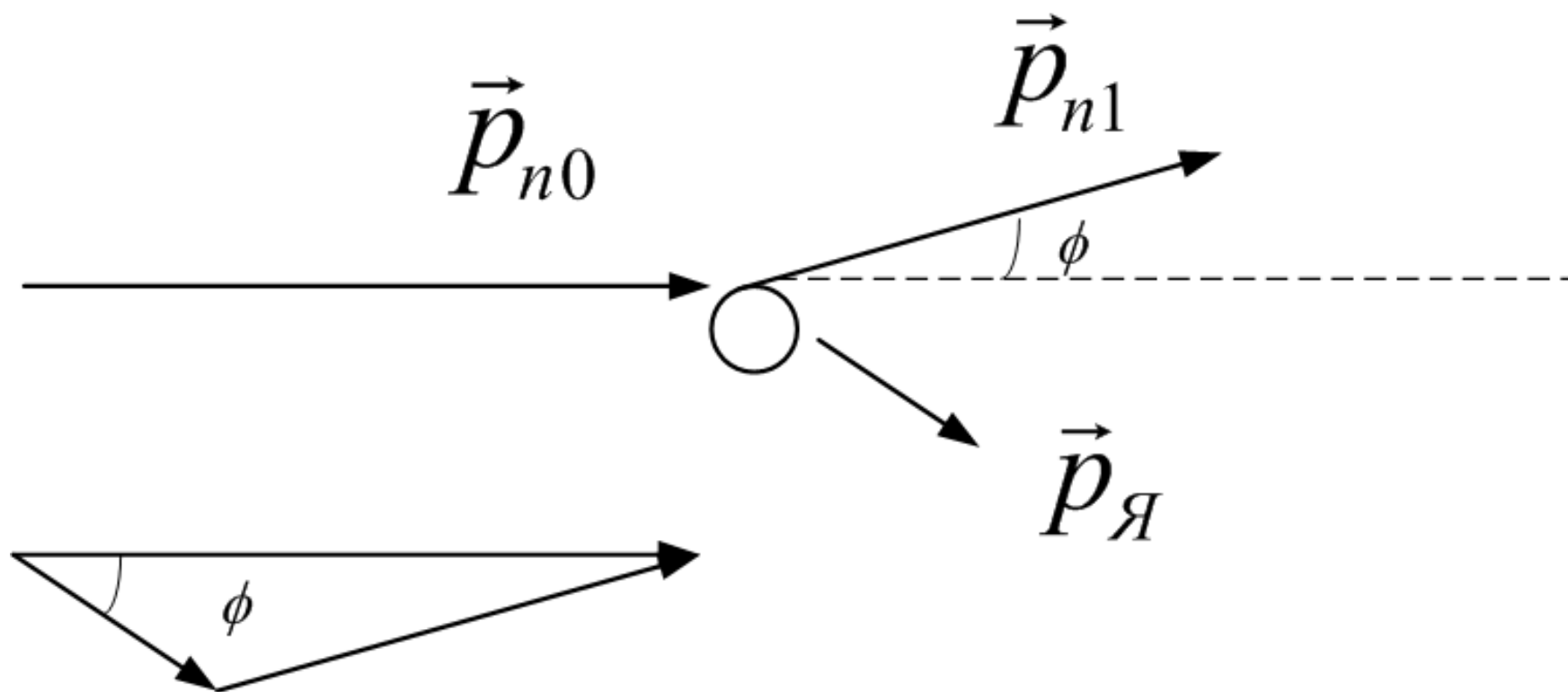
- ***упругое потенциальное рассеяние*** (нейтрон в ядро не попадает);
- ***ядерные реакции различного типа*** (при попадании нейтрона в ядро).

Важна энергия нейтронов, по ней их классифицируют как:

холодные, тепловые, надтепловые, промежуточные, быстрые, сверхбыстрые.

Иногда делят на две группы – *медленные и быстрые*. Их разделяет граница энергии **1 МэВ.**

4.3.1. Упругое рассеяние



$$3СИ : P_{n_1}^2 = P_{n_0}^2 + P_{я}^2 - 2 \cdot P_{n_0} \cdot P_{я} \cdot \cos \phi$$

$$3СЭ : E_{n_0} = E_{n_1} + E_{я}, \frac{P_{n_0}^2}{2m_n} = \frac{P_{n_1}^2}{2m_n} + \frac{P_{я}^2}{2M_{я}}$$

$$E_{я} = \frac{4m_n \cdot M_{я}}{(m_n + M_{я})^2} \cdot E_{n_0} \cdot \cos^2 \phi$$

$$\chi = \frac{M_{я}}{m_n} \quad E_{я} = \frac{4 \cdot \chi}{(1 + \chi)^2} \cdot E_{n_0} \cdot \cos^2 \phi$$

Энергия ядра (т.е. потери энергии нейтрона) будет максимальной при $\chi = 1$, т.е. при равенстве масс нейтрона и ядра.

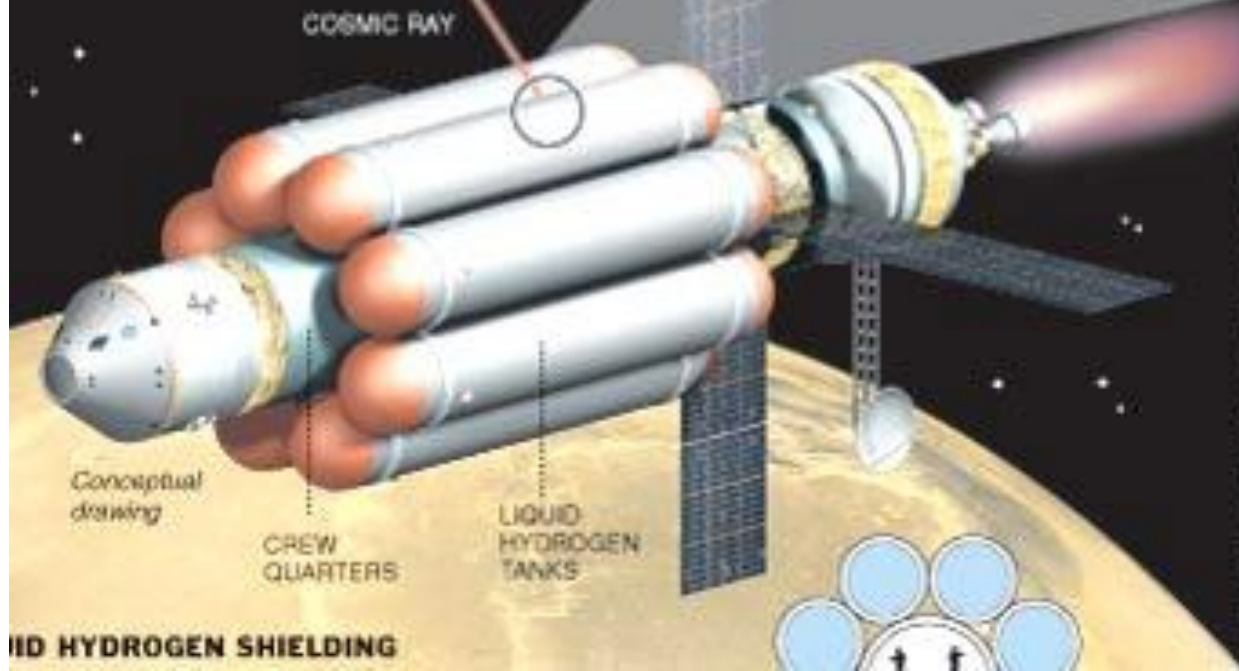
Это осуществляется при рассеянии нейтронов на *водородосодержащих* веществах, таких как вода, парафин и другие применяют для замедления нейтронов.

COSMIC RADIATION

Over millions of years, distant, exploding stars eject matter at high speeds.

Some ions in this matter are accelerated to nearly the speed of light, moving so fast they are stripped of their electrons.

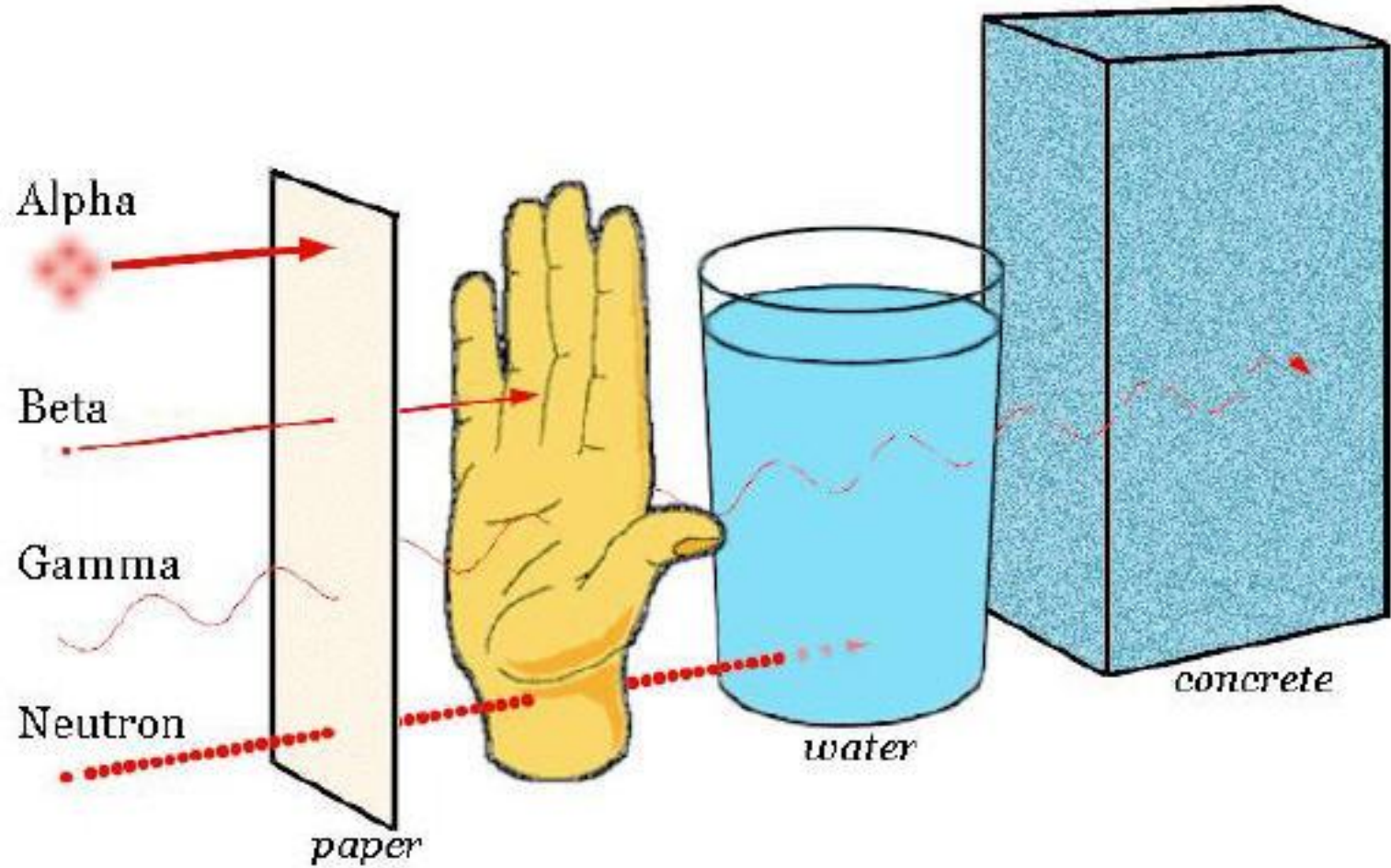
When these cosmic rays, mostly protons, hit a standing nucleus, they produce a shower of fast secondary particles, which may in turn produce further cascades of particles.



LIGHTER IS BETTER

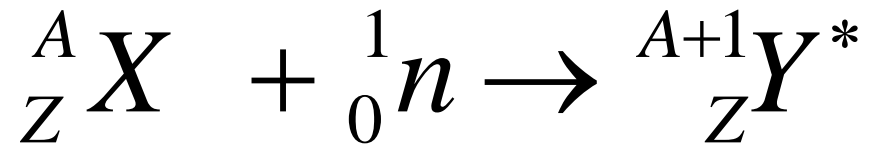
Cosmic rays lose some energy when they collide with a proton of another atom. Because hydrogen has one proton in its nucleus, each proton has the potential to stop incoming radiation. In elements with a heavier nucleus, some protons are hidden behind others in clumps and cannot be hit by cosmic rays.

LIQUID HYDROGEN SHIELDING





4.3.2. Ядерные реакции на нейтронах



Важны следующие типы реакций:
радиационный захват нейтрона,
реакции с образованием протона,
реакции с образованием α -
частицы, реакции с образованием
двух или более нейтронов.

- Пучок нейтронов при прохождении через вещество *экспоненциально ослабляется.*
- *Длина релаксации λ – это толщина вещества $x=\lambda$, пройдя которую поток нейтронов уменьшается в e раз ($e = 2.718$).*
- Длина релаксации зависит от энергии нейтронов и типа ядер.

- ***Наведённая радиоактивность:***
радионуклиды, образовавшиеся в
веществе под воздействием потока
нуклонов или гамма-квантов.
- **Нейтронная бомба.**