

β – распад

β – распад – вид радиоактивного распада атомных ядер, при котором из ядра вылетает β -частица, а ядро исходного нуклида превращается в ядро другого нуклида.

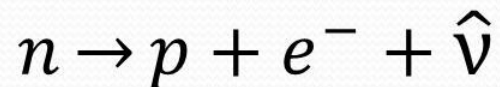
$$\beta \equiv e$$

Основные параметры электрона

- $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} = -4,803 \cdot 10^{-10} \text{ СГСЭ}$
- $m_e = 0,910939 \cdot 10^{-30} \text{ кг} = 5,485799 \cdot 10^{-4} \text{ а. е. м.}$
- $e/m_e = -1,75882 \cdot 10^{11} \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1}$
- $m_e c^2 = 0,511 \text{ МэВ}$
- $s = 1/2$
- $\mu_e = 9,28477 \cdot 10^{-24} \text{ Дж} \cdot \text{Тл}^{-1}$
- $r_e = 2,817941 \cdot 10^{-15} \text{ м}$

Разновидности β – распада

- β^- – распад





1934 г.

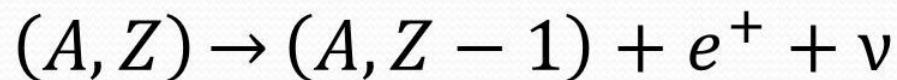
Позитрон (e^+) – античастица
электрона.

Аннигиляция - физический процесс, при котором частица и соответствующая ей античастица превращаются в фотоны или другие частицы – кванты физических полей другой природы.

$$e^{-} + e^{+} \rightarrow 2\gamma$$

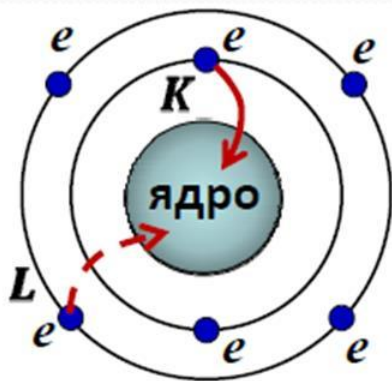
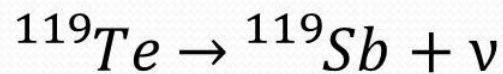
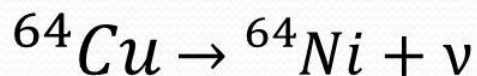
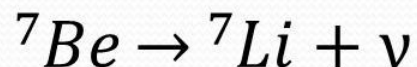
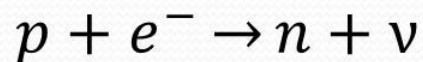
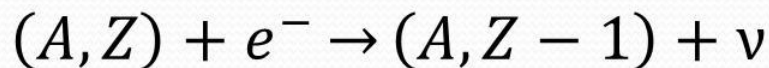
Разновидности β – распада

- β^+ – распад



Разновидности β – распада

- e – захват



Разновидности β – распада

При электронном захвате возможно возникновение Оже-электронов.

Оже-электроны – электроны, возникающие в результате возбуждения (ионизации) атомов с передачей безызлучательным образом энергии другому электрону (Оже-электрону), который может выйти в вакуум. Оже-эффект – явление, в котором возбужденный атом возвращается в исходное невозбужденное состояние путем испускания электрона с энергией, характерной для данного элемента.

Энергия β – распада

При β -распаде выделяется энергия

$$Q_{\beta^-} = m(A, Z) - [m(A, Z + 1) + m_e]$$

$$Q_{\beta^+} = m(A, Z) - [m(A, Z - 1) + m_e]$$

$$Q_{EC} = m(A, Z) - [m(A, Z + 1) + m_e]$$

Энергия β – распада

Энергия через массы атомов

$$M(A, Z) = m(A, Z) + Zm_e$$

$$Q_{\beta^-} = M(A, Z) - M(A, Z + 1)$$

$$Q_{\beta^+} = M(A, Z) - M(A, Z - 1) - 2m_e$$

$$Q_{EC} = M(A, Z) - M(A, Z + 1)$$

Энергия β – распада

Энергия через декременты масс

$$Q_{\beta^-} = \delta_{(A,Z)} - \delta_{(A,Z+1)}$$

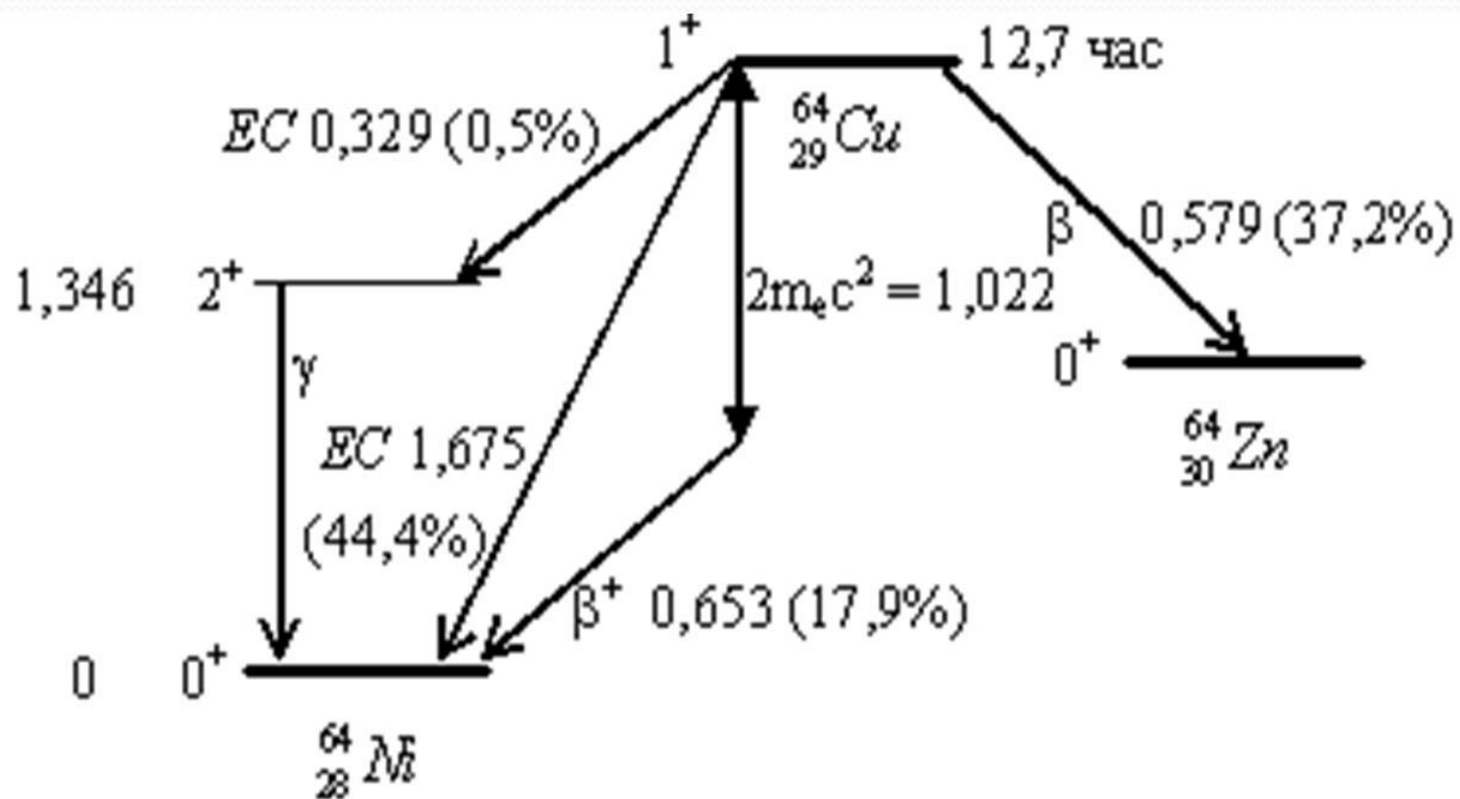
$$Q_{\beta^+} = \delta_{(A,Z)} - \delta_{(A,Z-1)} - 2m_e$$

$$Q_{EC} = \delta_{(A,Z)} - \delta_{(A,Z-1)}$$

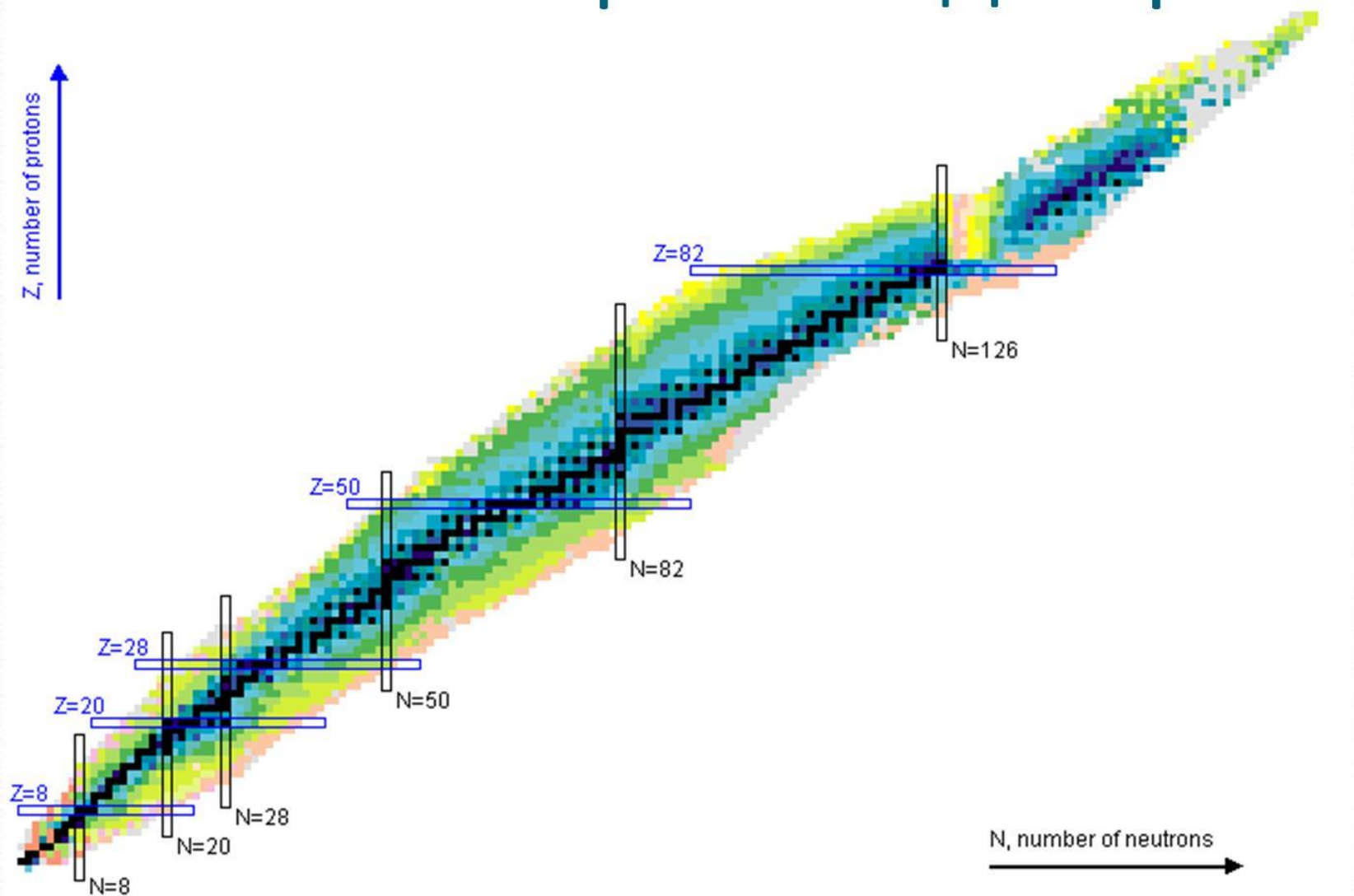
Условие устойчивости

Условие устойчивости ядра (A, Z) по отношению к β -распаду

$$\begin{aligned}M(A, Z) &< M(A, Z + 1) \\M(A, Z) &< M(A, Z - 1) + 2m_e \\M(A, Z) &< M(A, Z - 1)\end{aligned}$$



Протонно-нейтронная диаграмма



Взаимодействие β -частиц с веществом

β -частицы проходя через вещество взаимодействуют через кулоновское поле с электронами встречных атомов, вызывая их ионизацию, возбуждение.

Плотность потерь энергии β -частицами:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right) = \frac{2\pi e^4 n_e}{m_e v^2} \left[\ln \frac{m_e v^2 E}{2I^2(1-\beta^2)} + f(\beta) \right]$$
$$f(\beta) = 1 - \beta^2 - \left(2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2\right) \ln 2 + \frac{1}{8}(1 - \sqrt{1-\beta^2})^2$$

Кроме потерь на ионизацию и возбуждение атомов среды, быстрые β -частицы могут испытывать **радиационные потери энергии**, возникающие в результате резкого торможения частицы при ее пролете мимо атомного ядра.

При малых энергиях электронов преобладают ионизационные потери энергии, но по мере роста энергии роль радиационных потерь возрастает, и при энергии $E \approx \frac{800}{Z}$ интенсивности ионизационных и радиационных потерь энергии сравниваются.

Энергии β -распада

$$Q_{\beta} = 0 \div 15 - 20 \text{ МэВ}$$

$$Q_{\beta^{+}}(^{9}\text{C}) = 16,498 \text{ МэВ}$$

$$Q_{\beta^{-}}(^{14}\text{B}) = 20,644 \text{ МэВ}$$

$$Q_{\beta^{-}}(^{187}\text{Re}) = 2,66 \text{ кэВ}$$

$$Q_{EC}(^{163}\text{Ho}) = 2,58 \text{ кэВ}$$

Периоды полураспада β -активных ядер

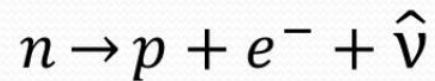
$$T_{1/2} = 0,01c \div 10^{18} \text{ лет}$$

$$T_{1/2}(^{187}\text{Re}) = 4,35 \cdot 10^{10} \text{ лет}$$

$$T_{1/2}(^{180}\text{Ta}) = 1,2 \cdot 10^{15} \text{ лет}$$

β -распад свободного нейтрона

● Может ли свободный нейтрон испытывать β -распад?



$$m_n > m_p + m_e$$



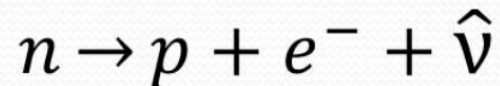
1949-1950 гг.

Петр Ефимович Спивак

- $T_{1/2} = 12,5$ мин

в 1978г. $T_{1/2} = (10,13 \pm 0,09)$ мин

Вывод: нейтроны могут в свободном состоянии испытывать β -распад по схеме



с $T_{1/2} \approx 10,5$ мин

Энергетические спектры β -частиц

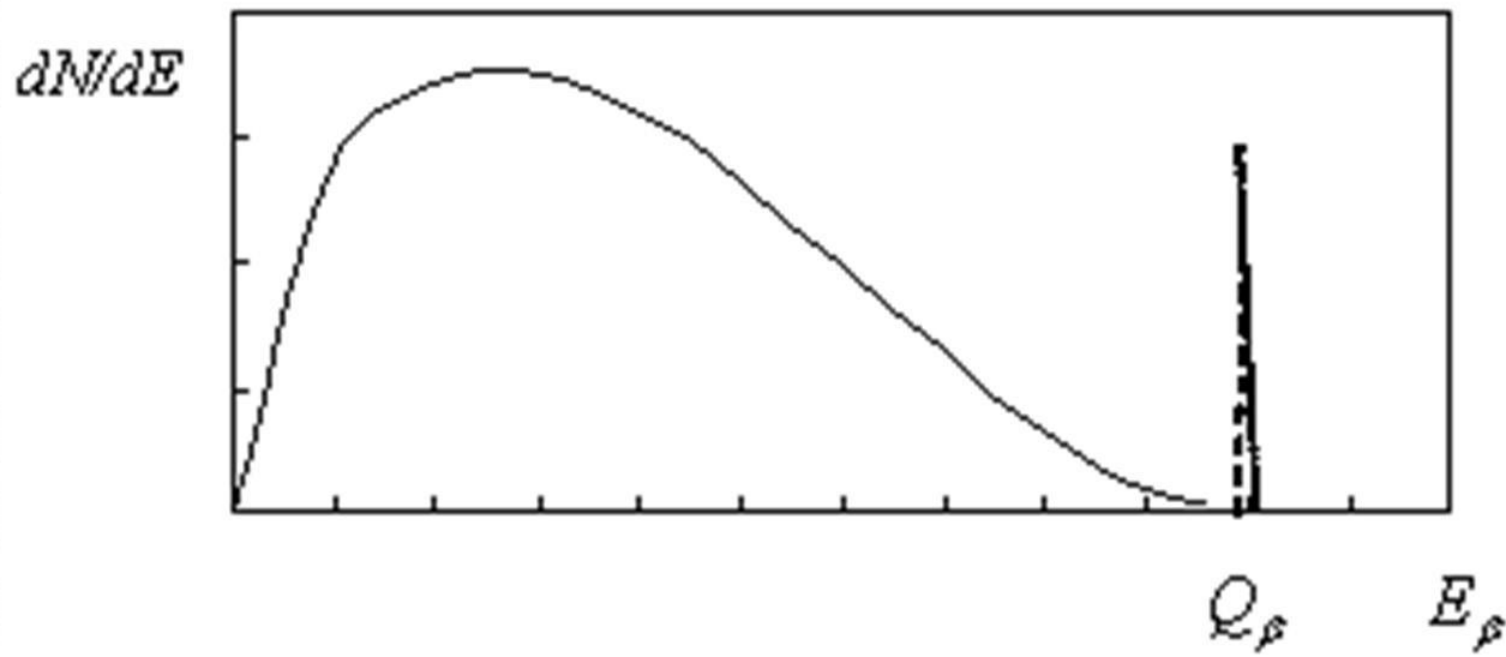
Средняя энергия бета-частиц

$$\overline{E_\beta} \approx \frac{1}{3} Q_\beta$$

$$Q_\beta = E_\beta + E_\nu + E_{\text{я.о.}}$$

Распределение энергии между этими частицами происходит неоднозначно и зависит от того, под какими углами они разлетаются по отношению друг к другу. Основная часть энергии делится между β -частицей и нейтрино.


Энергетические спектры β -частиц



Нейтрино



В 1930 г. Вольфганг Паули предположил, что при β -распаде из ядра одновременно с электроном вылетает еще одна частица, обладающая рядом специфических свойств.



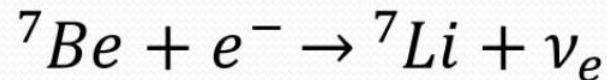
- $$E_v \approx \frac{2}{3} Q_\beta$$
$$s_v = 1/2$$

Экспериментальное обнаружение нейтрино

- Опыт Лейпунского (1936г.) Исследовались импульсы частиц, образующихся в реакции



- Опыт Аллена (1942г.)



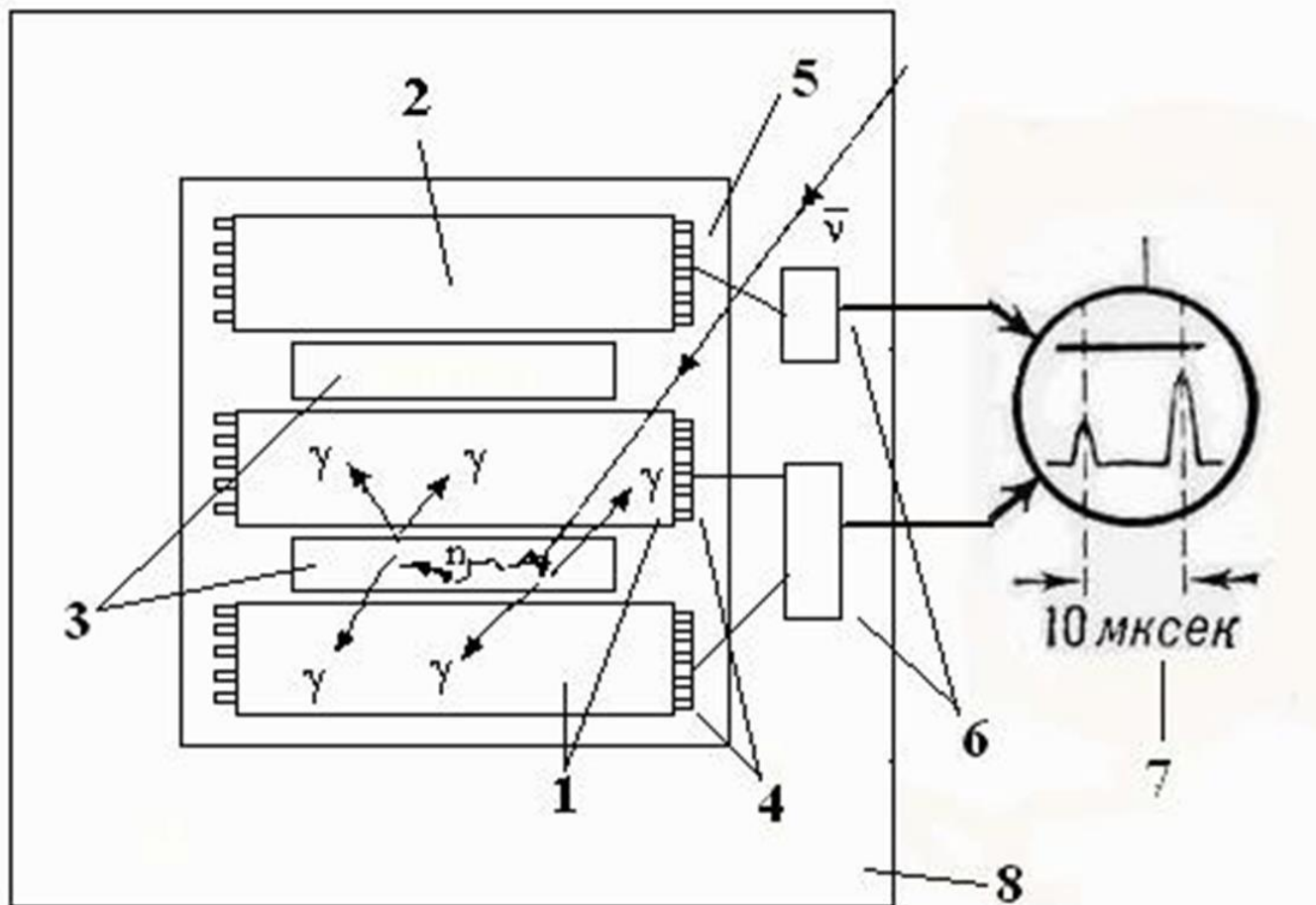
Опыты Рейнеса и Коуэна



1953-1954гг.

Фредерик Рейнес и Клайд
Коуэн

Опыты Рейнеса и Коуэна



Нейтрино и антинейтрино

Нейтрино и антинейтрино – это разные частицы?



Опыт Дэвиса 1955-1959гг.

Теория β -распада

Фундаментальные взаимодействия:

1. Гравитационное
2. Электромагнитное
3. Ядерное
4. Слабое

Правила отбора

Сравнительный период β -распада

$$FT = \frac{2 \ln 2 \pi^3 \hbar^7}{V^2 |M|^2 m^5 c^4}$$

V -объем ядра

M – матричный элемент

m – масса электрона

Правила отбора

- Разрешенные

$$\pi_i \pi_k = +1$$

$$\lg FT \leq 5,9$$

- ✓ Правило отбора Ферми

$$\Delta I = 0$$

- ✓ Правило отбора Гамова-Теллера

$$\Delta I = 0, \pm 1$$

Правила отбора

- Первый запрещенный по четности

$$\Delta I^{\Delta\pi} = 0^-, 1^-$$

$$5,9 < \lg FT \leq 7,2$$

- Второй запрещенный по четности

$$\Delta I^{\Delta\pi} = 2^+$$

$$11 < \lg FT \leq 12,8$$

- Первый уникальный

$$\Delta I^{\Delta\pi} = 2^-$$

$$7,2 < \lg FT \leq 11$$

Правила отбора

- Третий запрещенный по четности

$$\Delta I^{\Delta\pi} = 3^+$$

$$12,8 < \lg FT \leq 14,8$$

- Второй уникальный

$$\Delta I^{\Delta\pi} = 3^-$$

$$14,8 < \lg FT$$

- Четвертый запрещенный по четности

$$\Delta I^{\Delta\pi} = 4^+$$

- Третий уникальный

$$\Delta I^{\Delta\pi} = 4^-$$

Несохранение четности при β -распаде

$\pi = +1$ – для четных состояний

$\pi = -1$ – для нечетных состояний

1956 г. При распаде К-мезонов в одних случаях образуются системы вторичных частиц, описываемых четными волновыми функциями, а в других – нечетными функциями.

Распад К-мезонов – слабое взаимодействие.

Теория Ли и Янга



1956 г. Ли Цзун-дао и Янг Чень-нин показали, что теорию β -распада можно построить без опоры на закон сохранения четности.

Опыт Ву



В 1957 г. Ву Цзянь-сюн

Цель опыта: измерение углового распределения β -частиц относительно направления спина исходных ядер.