

## Бета-распад.

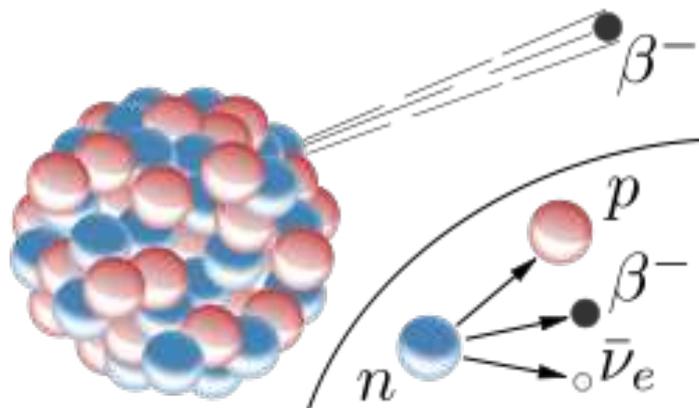


Рисунок 1: Электронный бета-распад (представление художника). На врезке в правом нижнем углу - продукты распада нейтрона. С сайта [1].

К процессам бета-распада относят несколько процессов, связанных с взаимопревращением нейтрона и протона, при которых происходит испускание или захват электрона либо испускание позитрона [1][2]. При этом ядро превращается в ядро-изобару (ядро с тем же атомным номером), сдвигаясь в таблице Менделеева на одну<sup>1</sup> клетку влево (К-захват или позитронный  $\beta^+$ -распад) или вправо (электронный  $\beta^-$ -распад). Все эти процессы происходят посредством слабого взаимодействия, поэтому периоды полураспада в этих процессах обычно довольно велики, обычно минуты и часы.

От процессов бета-распада необходимо отличать процессы внутренней конверсии, когда снятие возбуждения ядра происходит через передачу избыточной энергии одному из внутренних электронов. При этом *атом* также испускает электрон, однако *ядро* остаётся неизменным по составу и отсутствует испускание нейтрино.

Бета-излучение было выделено как отдельный вид частиц Резерфордом в 1899 году. Беккерель в 1900 году определил удельный заряд этих частиц и обнаружил, что он совпадает с удельным зарядом электрона, измеренным ранее Дж.Дж.Томсоном.

В отличие от альфа-частиц, спектр бета-частиц непрерывный [3], начинающийся с нулевых энергий (рисунок 2). Максимальная энергия бета-частиц во всех ядрах ограничена примерно 10МэВ, при большем избытке энергии в ядре становится возможным испускание одиночного нуклона, которое гораздо более вероятно, так как связано с сильным взаимодействием. При энергии бета-частицы порядка 1МэВ испускаемые электроны и позитроны являются релятивистскими (масса покоя электрона 0.511МэВ) и при их рассмотрении необходимо учитывать эффекты теории относительности.

<sup>1</sup> За исключением редко встречающихся процессов двойного бета-распада, о которых будет вкратце упомянуто ниже.

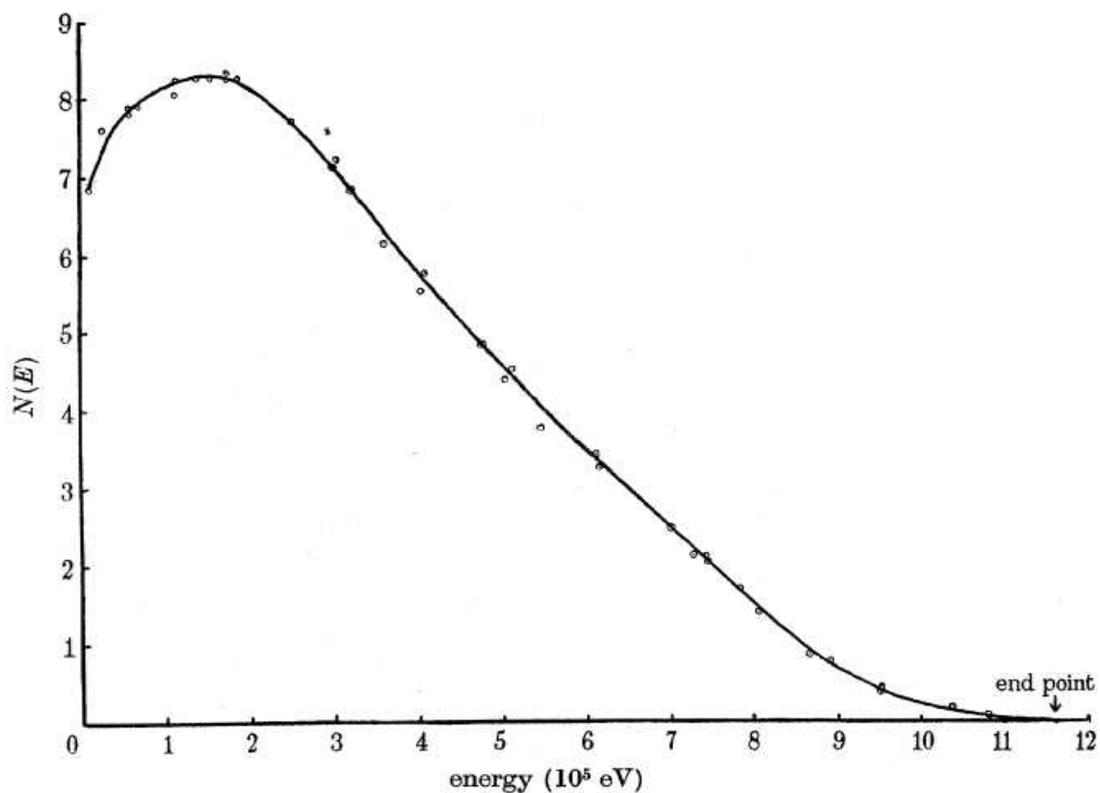


Рисунок 2: Энергетический спектр электронов при бета-распаде висмута-210. Из статьи [3].

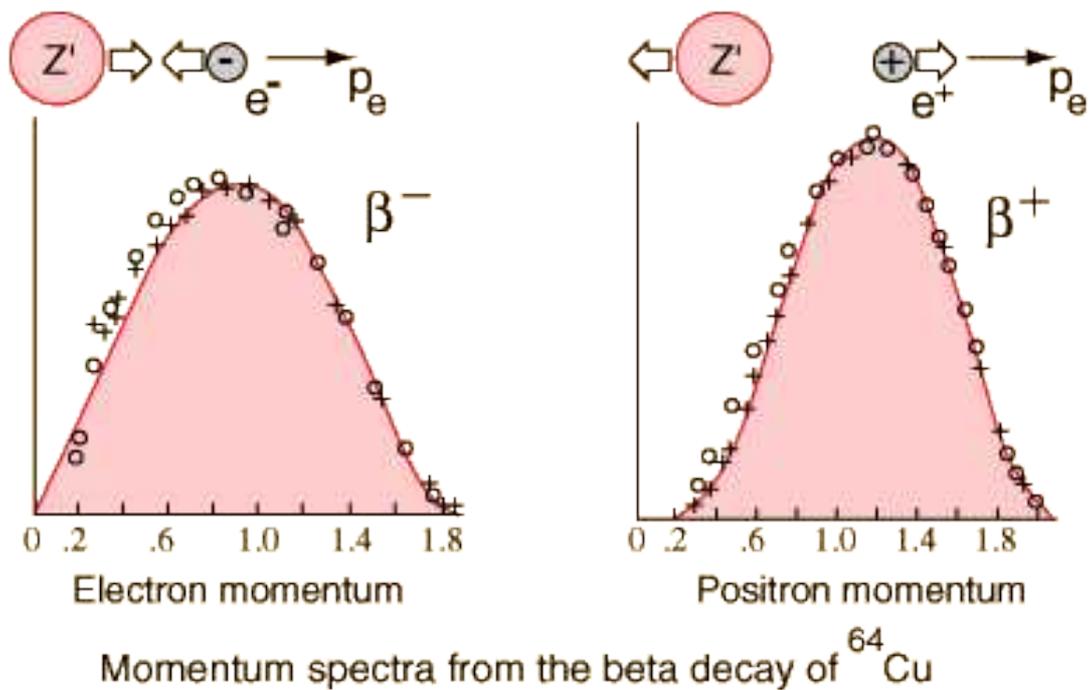


Рисунок 3: Распределение продуктов электронного (слева) и позитронного (справа) бета-распада меди-64. С сайта [2] (по работе J. R. Reitz, Phys. Rev. 77, 50 (1950)).

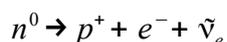
Электрон или позитрон являются заряженными частицами и взаимодействуют с ядром, из которого вылетели: электрон тормозится полем ядра, а для позитрона (как и ранее для альфа-частиц) должен быть потенциальный барьер внутри ядра. Однако, из-за меньшей массы покоя, эффекты туннелирования через кулоновский барьер в бета-распаде несущественны: дебройлевская длина волны электрона с энергией 1МэВ равна  $10^{-12} \text{ м}$  и много больше размера ядра. Небольшой вклад кулоновского взаимодействия в энергию вылетающих частиц присутствует, он очень чётко проявляется в спектрах бета-распада меди-64, способной как к электронному ( ${}^{64}\text{Cu} \rightarrow {}^{64}\text{Zn}$ ), так и к позитронному распаду ( ${}^{64}\text{Cu} \rightarrow {}^{64}\text{Ni}$ ). Из рисунка 3 видно, что позитроны движутся чуть быстрее электронов, что связано именно с взаимодействием с ядром после испускания частицы: позитроны отталкиваются, электроны — притягиваются.

Непрерывность распределения бета-частиц по энергии связана с тем, что в процессе бета-распада участвует и третья частица: электронное нейтрино или антинейтрино. Без учёта третьей частицы невозможно получить непрерывный спектр испускаемых частиц при заданной разности энергий исходного и конечного ядра: законы сохранения энергии и импульса дают единственное решение в двухчастичном процессе, что должно приводить к дискретному спектру (как у альфа-частиц). Существование нейтрино было предположено В.Паули в 1930 для объяснения непрерывного спектра бета-распада. Более подробная теория была построена Э.Ферми в 1934. Нейтрино — это незаряженная и практически безмассовая частица<sup>1</sup>. В процессе бета-распада нейтрино уносит некоторую (случайную) часть энергии и импульса.

Рассмотрим подробнее виды бета-распада (отметим сразу, что все эти процессы оказываются не внутриядерными, а внутринуклонными):

#### Электронный бета-распад или $\beta^-$ -распад.

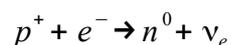
В этом процессе нейтрон испускает электрон и электронное антинейтрино, превращаясь в протон. Реакция распада:



В этом процессе испускается электрон, заряд ядра увеличивается на 1 (смещение вправо на одну позицию в таблице Менделеева). Образующийся атом оказывается ионизованным, так как энергия вылетающего электрона гораздо больше энергии связи внешних электронов в атоме. Этот процесс обычно происходит в ядрах с избытком нейтронов. Если  $Z$  - число протонов в исходном ядре, а  $E(A, Z, N_e)$  полная энергия иона (включая энергию ядра и электронов) то условие энергетической выгоды такого распада  $E(A, Z, N_e) > E(A, Z+1, N_e) + m_e c^2$ .

#### К-захват.

В этом процессе ядром захватывается электрон внутренней электронной орбитали (обычно самой нижней 1s или К-орбитали):



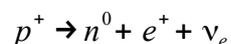
В том процессе испускается только трудноуловимое нейтрино, заряд ядра уменьшается на 1 (смещение влево в таблице Менделеева). Процесс идёт в ядрах с избытком протонов. Условие

<sup>1</sup> Современная верхняя оценка массы покоя электронного нейтрино составляет около 1.5эВ, однако наблюдение превращения разных нейтрино друг в друга (нейтринных осцилляций) показывает на наличие некоторой ненулевой массы всех нейтрино.

энергетической выгоды  $E(A, Z, N_e) > E(A, Z-1, N_e-1)$

### Позитронный бета-распад или $\beta^+$ -распад.

В этом процессе в ядре с избытком протонов один из протонов испускает позитрон и электронное нейтрино, превращаясь в нейтрон:



Заряд ядра, как и при К-захвате уменьшается на 1 (сдвиг влево в таблице Менделеева). Отметим, что свободный протон стабилен, его распад возможен только внутри ядра, где из-за взаимодействия нуклонов энергия протонного состояния может оказаться выше энергии нейтронного состояния. Также можно заметить, что процесс К-захвата энергетически выгоднее позитронного распада, так как при К-захвате используется внутриатомный электрон, а при позитронном распаде рождается позитрон, что даёт различие по энергии на  $2m_e c^2$ , условие энергетической выгоды позитронного распада

$E(A, Z, N_e) > E(A, Z-1, N_e) + m_e c^2 \approx E(A, Z-1, N_e-1) + 2m_e c^2$ . То есть, всегда параллельно с позитронным распадом происходит и процесс К-захвата, в то время как при малой разности энергий исходного и конечного атомов возможны случаи, когда происходит только К-захват.

### Двойной бета-распад.

Наблюдались процессы, когда одновременно испускается два электрона (соответственно, сдвиг происходит на две позиции вправо в таблице Менделеева) [4]. Такой процесс происходит обычно параллельно с более интенсивным обычным бета-распадом, поэтому его достаточно трудно наблюдать. Обычно для наблюдения двойного бета-распада необходимо, чтобы прямой бета-распад был энергетически невыгоден. Такой распад наблюдался в нескольких изотопах:  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{96}\text{Zr}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{116}\text{Gd}$ ,  $^{128}\text{Te}$ ,  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{130}\text{Ba}$ ,  $^{136}\text{Xe}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{238}\text{U}$ . В случае урана-238 продуктом двойного бета-распада является плутоний-238. Теоретически также возможны процессы двойного К-захвата, двойного позитронного распада и одновременного К-захвата и позитронного распада, однако такие процессы не наблюдались на фоне более вероятных обычных процессов бета-распада.

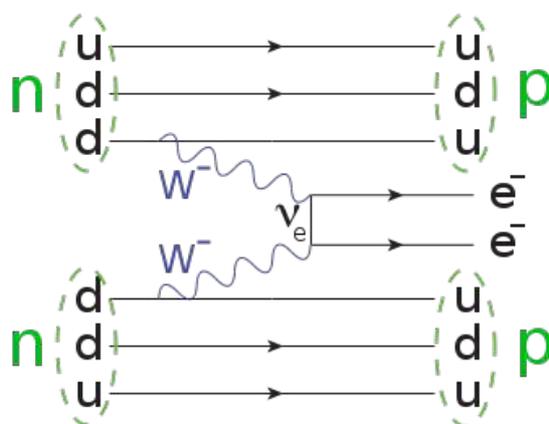


Рисунок 4: Диаграмма Фейнмана для гипотетического двойного безнейтринного бета-распада. С сайта [4].

Теоретически возможен как «нормальный» двойной бета-распад, при котором образуется два нейтрино, так и безнейтринный двойной бета-распад, в котором нейтрино выступает как виртуальная частица, рождаясь и тут же уничтожаясь. Такой процесс возможен, если

нейтрино и антинейтрино являются одной и той же частицей (так называемые майорановские частицы) и обладают некоторой массой (наличие которой следует из обнаруженных нейтринных осцилляций). Обнаружение такого эффекта позволило бы получить информацию о массе нейтрино. Поиски безнейтринного двойного бета-распада активно ведутся в нескольких лабораториях, но пока не дали положительного результата (список экспериментов приведён на сайте [4]).

Интересно отметить, что одно и то же ядро может одновременно испытывать разные виды бета-распада: приведённые выше энергетические соображения о выгоде бета-распадов разных типов не являются взаимоисключающими. Например, в уже упоминавшемся ядре изотопа меди-64 могут происходить электронный бета-распад (39%, образуется цинк-64), позитронный бета-распад (17%, образуется никель-64) и К-захват (43%, образуется никель-64).

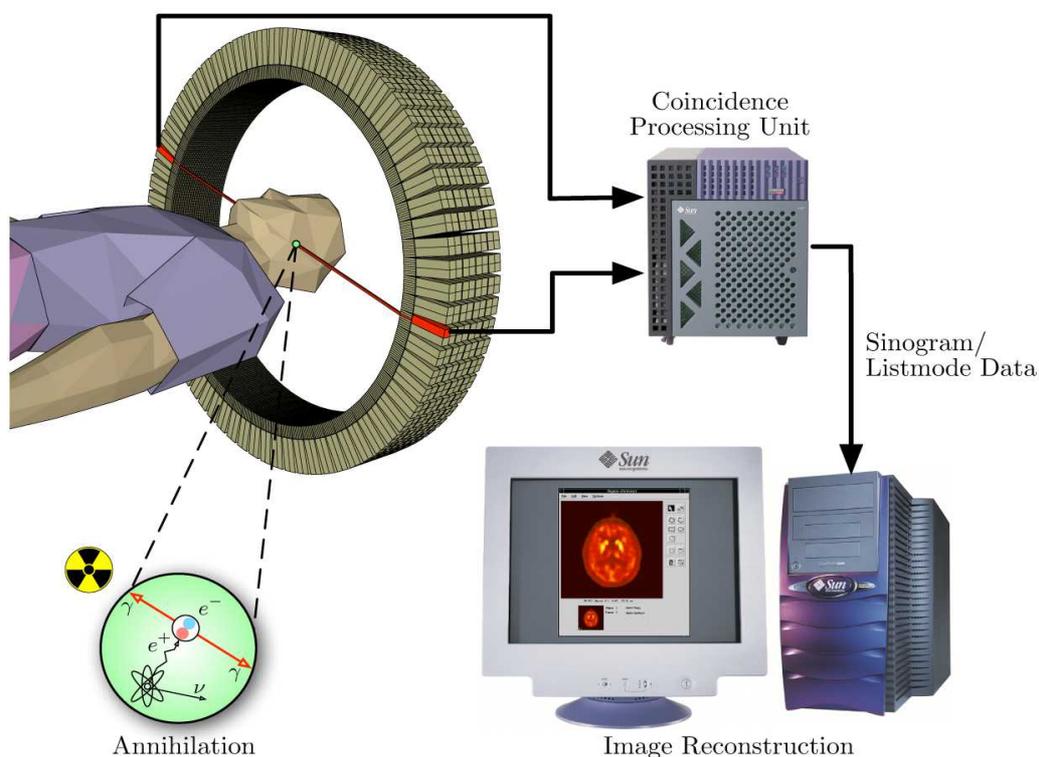


Рисунок 5: Схема работы позитронной томографии. С сайта [5].

Важные практические применения бета-активных изотопов связаны с медицинской диагностикой. Встраивая изотопы в биологически активные молекулы можно добиться скопления «меченных» молекул в определённых органах пациента. Одной из техник является позитронная эмиссионная томография [5], при которой используется процесс позитронного бета-распада. Затормаживающийся в тканях позитрон аннигилирует с электроном образуя пару гамма квантов, разлетающихся в противоположных направлениях<sup>1</sup>, которые улавливаются детектором. Детектор работает по принципу схемы совпадений — для исключения случайных срабатываний (например, пролёт частицы космического излучения) учитываются только события, когда массивом детекторов зафиксировано одновременно два гамма-кванта. Два сработавших детектора определяют прямую, на которой лежала точка

<sup>1</sup> Образование при аннигиляции покоящихся электрона и позитрона именно пары (а не одного) гамма-кванта и разлёт получившихся гамма-квантов в строго противоположных направлениях являются требованиями закона сохранения импульса.

аннигиляции — то есть точка накопления «меченных» изотопом молекул. Набором статистики и её компьютерной обработкой удаётся по множеству таких построений построить карту плотности распределения накопленных «меченных» молекул. Также рассматриваются возможности использования ионизирующего действия бета-излучения для проведения локальной противораковой лучевой терапии.

## Литература

- 1: wikipedia.org, Beta decay, 2016, [http://en.wikipedia.org/wiki/Beta\\_decay](http://en.wikipedia.org/wiki/Beta_decay)
- 2: R.Nave, HyperPhysics: Nuclear, 2016, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- 3: G.J.Neary, The beta-ray spectrum of radium E [Bi-210], 1940
- 4: wikipedia.org, Double beta decay, 2016, [http://en.wikipedia.org/wiki/Double\\_beta\\_decay](http://en.wikipedia.org/wiki/Double_beta_decay)
- 5: wikipedia.org, Positron emission tomography, 2016, [http://en.wikipedia.org/wiki/Positron\\_emission\\_tomography](http://en.wikipedia.org/wiki/Positron_emission_tomography)