

2.2 Бета - распад

Бета-распад (β - распад) – самопроизвольное превращение ядер, сопровождающееся испусканием (или поглощением) электрона и антинейтрино или позитрона и нейтрино. Известны типы бета-распада: электронный распад (превращение нейтрона в протон), позитронный распад (протона в нейтрон) и электронный захват. При электронном бета-распаде заряд ядра увеличивается на 1, при позитронном – уменьшается на 1; массовое число не меняется. К бета распаду относится также спонтанное превращение свободного нейтрона в протон, электрон и антинейтрино.

Бета-распад - спонтанное превращение ядра (A, Z) в ядро-изобар $(A, Z \pm 1)$ в результате испускания лептонов (электрон и антинейтрино, позитрон и нейтрино), либо поглощения электрона с испусканием нейтрино (e -захват).

Бета-распад ядер – самопроизвольное взаимное превращение внутриядерных нейтронов и протонов, происходящее по одному из перечисленных ниже направлений с испусканием или поглощением электронов (e^-) или позитронов (e^+), нейтрино (ν) или антинейтрино ($\bar{\nu}$).

1. Электронный β -распад; β^- -распад: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

Например: ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}$ (${}^{14}_6\text{C} \xrightarrow{\beta^-} {}^{14}_7\text{N}$)

2. Позитронный β -распад; β^+ распад: $p \rightarrow n + e^+ + \nu$

Например: ${}^{11}_6\text{C} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + e^+ + \nu$ (${}^{11}_6\text{C} \xrightarrow{\beta^+} {}^{11}_5\text{B}$)

3. Электронный захват: $p + e^- \rightarrow n + \nu$

Например: ${}^7_4\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7_3\text{Li} + \nu$ (${}^7_4\text{Be} \xrightarrow{e^-} {}^7_3\text{Li}$)

Бета-излучение - корпускулярное излучение с непрерывным энергетическим спектром, состоящее из отрицательно или положительно заряженных электронов или позитронов (β^- - или β^+ - частиц) и возникающее при радиоактивном β - распаде ядер или нестабильных частиц. Характеризуется граничной энергией спектра E_β .

β - радиоактивность (бета-излучение) представляет собой поток частиц с массой, равной $1/1837$ массы протона, образующихся при бета-распаде различных элементов от самых легких (нейтрон) до самых тяжелых (радий-228). Отрицательно заряженная бета-частица фактически представляет собой электрон, положительно заряженная - позитрон. Бета-излучение обладает большей проникающей способностью по сравнению с α -излучением, но все равно может быть остановлено сравнительно тонким (несколько сантиметров) слоем металла или пластика.

Бета – частицы – электроны и позитроны, испускаемые при бета-распаде ядер и свободного нейтрона.

β^- -распад характерен для нейтроноизбыточных изотопов, в которых число нейтронов больше, чем в устойчивых (а для элементов с $Z \geq 83$ – больше, чем в β -стабильных, испытывающих только α -распад); напротив, β^+ -распад и электронный захват свойственны нейтронодефицитным изотопам, более лёгким, чем устойчивые или β -стабильные.

Известно примерно 1500 β -радиоактивных изотопов всех элементов Периодической системы кроме самых тяжёлых ($Z=102, 103, 104$), для которых пока β -радиоактивность не была отмечена.

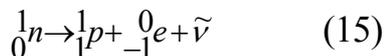
Энергия β -распада ныне известных изотопов лежит в пределах от $E_{\beta^-} = 0,0186$ МэВ (${}^3_1\text{H} \xrightarrow{\beta^-} {}^3_2\text{He}$) до $E_{\beta^+} = 16,6$ МэВ (${}^{12}_6\text{N} \xrightarrow{\beta^+} {}^{12}_6\text{C}$); периоды полураспада заключены в широком интервале времён, от $1,3 \cdot 10^{-2}$ сек (${}^{12}_6\text{N}$) до $2 \cdot 10^{13}$ лет (природный радиоактивный изотоп ${}^{180}\text{W}$).

Энергия β -распада, E_β , делится между тремя частицами – электроном (позитроном), антинейтрино (нейтрино) и остаточным ядром. В результате β -частицы, в отличие от α -частиц, не обладают строго определённой энергией, и спектр их является не линейчатым, а сплошным – от нуля до $E_{\beta_{\text{макс}}} \cong E_\beta$ (или $E_{\beta_{\text{макс}}} \cong E_\beta - E^*$, если остаточное ядро оказывается в возбуждённом состоянии. Обе частицы, испускаемые или поглощаемые при β -распаде, - электрон (позитрон) и антинейтрино (нейтрино) – обладают собственным моментом количества движения – спином, равным $\frac{1}{2}$ (в единицах \hbar). Поэтому разность полных моментов количества движения (спинов) исходного и конечного ядер при β -распаде всегда целочисленна: $\Delta I = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

2.2.1 Электронный β -распад

β -Распад характерен для большого числа радиоактивных изотопов. В результате опытов по изучению отклонения β -частиц в магнитном и электрическом полях было установлено, что (β^- -лучи являются потоком электронов, движущихся со скоростью, составляющей от 0,1 до 0,99 скорости света. Внутри ядер электроны существовать не могут, они возникают при β -распаде в результате превращения нейтрона в протон. Этот процесс может происходить не только внутри ядра, но и со свободными нейтронами.

При бета-распаде из ядра вылетает электрон. Измерения показали, что в этом процессе наблюдается кажущееся нарушение закона сохранения энергии, так как суммарная энергия протона и электрона, возникающих при распаде нейтрона, меньше энергии нейтрона. В 1931 году В.Паули высказал предположение, что при распаде нейтрона выделяется еще одна частица с нулевыми значениями массы и заряда, которая уносит с собой часть энергии. Новая частица получила название нейтрино (маленький нейтрон). Из-за отсутствия у нейтрино заряда и массы эта частица очень слабо взаимодействует с атомами вещества, поэтому ее чрезвычайно трудно обнаружить в эксперименте. Ионизирующая способность нейтрино столь мала, что один акт ионизации в воздухе приходится приблизительно на 500 км пути. Эта частица была обнаружена лишь в 1953. В настоящее время известно, что существует несколько разновидностей нейтрино. В процессе распада нейтрона возникает частица с нулевой массой покоя, которая называется **электронным антинейтрино**. Она обозначается символом $\bar{\nu}$.



Электрон, образующийся в результате распада одного из ядерных нейтронов, немедленно выбрасывается из «родительского дома» (ядра) с огромной скоростью, которая может отличаться от скорости света лишь на доли процента. Так как распределение энергии, выделяющейся при β -распаде, между электроном, нейтрино и дочерним ядром носит случайный характер, β -электроны могут иметь различные скорости в широком интервале.

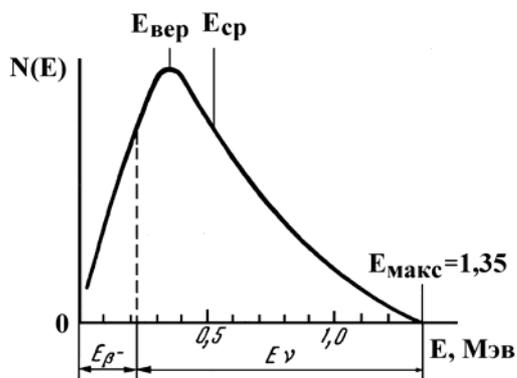


Рис.10. β^- -спектр ${}^{40}\text{K}$: $N(E)$ - число β^- - частиц с энергией

При каждом акте β^- -распада энергия распределяется между β^- -частицей и антинейтрино по закону случая, поэтому β^- -излучение имеет непрерывный энергетический спектр (**Рис.10**). Сумма энергий (β^- -частицы и антинейтрино) всегда равна постоянной величине, характерной для данного радиоактивного изотопа и называемой максимальной энергией превращения.

β^- -Распад имеет место при относительном избытке нейтронов в ядре. Поскольку число нуклонов при β^- -распаде не меняется, массовое число ядра остается тем же.

Согласно правилу сдвига Фаянса и Содди, при β^- -распаде зарядовое число Z увеличивается на единицу, а массовое число A остается неизменным.

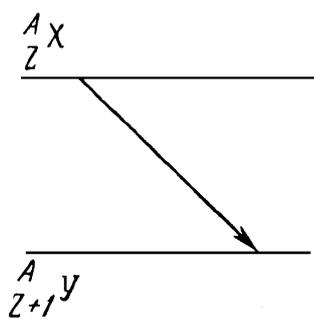


Рис.10. Схематическое изображение β^- -распада

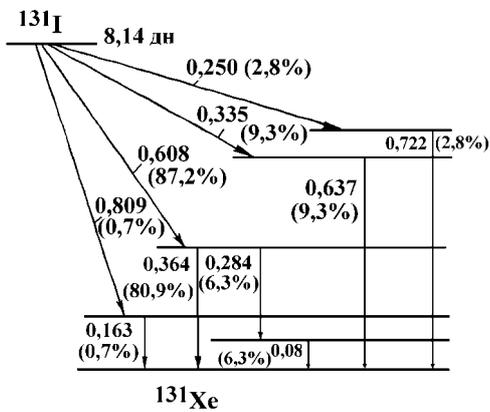
Дочернее ядро оказывается ядром одного из изотопов элемента, порядковый номер которого в Периодической таблице элементов на единицу превышает порядковый номер исходного ядра.

На схемах электронный β^- -распад изображается стрелкой, направленной вправо (**Рис.10** и **Рис.11**).

Нейтрино (итал. *Neutrino*, уменьшит. от *neutrone* – нейтрон) (ν), стабильная незаряженная элементарная частица со спином $\frac{1}{2}$ и, возможно, нулевой массой; относится к лептонам. Нейтрино участвуют только в слабом и гравитационном взаимодействии и поэтому чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом. Различают электронное нейтрино (ν_e), всегда выступающее в паре с электроном или позитроном, мюонное нейтрино (ν_μ), выступающее в паре с мюоном, и τ -нейтрино (ν_τ), связанное с тяжёлым лептоном. Каждый тип нейтрино имеет свою античастицу ($(\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau)$), отличающуюся от нейтрино знаком соответствующего лептонного заряда и спиральностью. Нейтрино имеют левую спиральность (спин направлен против движения частицы), а антинейтрино – правую (спин – по направлению движения).

Антинейтрино ($\bar{\nu}$) - античастица нейтрино, отличающегося от него знаком лептонного заряда и спиральностью.

Рис.11. Схема распада ^{131}I



Теория β -распада была создана в 1933 году Э. Ферми, который использовал гипотезу В. Паули о рождении в β -распаде нейтральной частицы, имеющей близкую к нулю массу покоя и названной нейтрино ν . Ферми обнаружил, что β -распад обусловлен новым типом взаимодействия частиц в природе – «слабым» взаимодействием и связан с процессами превращения в родительском ядре нейтрона в протон с испусканием электрона e^- и антинейтрино $\bar{\nu}$ (β^- -распад), протона в нейтрон с испусканием позитрона e^+ и нейтрино ν (β^+ -распад), а также с захватом протоном атомного электрона

и испусканием нейтрино ν (электронный захват).

В 1934 Ферми заложил основы теории слабых взаимодействий и β -распада. К 1958 эта теория была обобщена в универсальную четырехфермионную теорию слабых взаимодействий, согласно которой элементарный процесс слабого взаимодействия представляет собой локальное взаимодействие четырех фермионов, т. е. частиц с полуцелыми спинами. В настоящее время процессы как слабого, так и электромагнитного взаимодействия находят объяснение в новой теории - объединенной теории электрослабых взаимодействий. Согласно этой теории, слабое взаимодействие осуществляется путем обмена виртуальными промежуточными бозонами. В теории Ферми предполагалось, что взаимодействие, которое приводит к бета-распаду мало по сравнению с взаимодействием, которое формирует состояния ядра.

В процессе β -распада выделяется энергия.

$$E_{\beta^-} = [M^a(A,Z) - M^a(A,Z+1) - m_e]c^2 - \beta^- \text{-распад}, \quad (16a)$$

$$E_{\beta^+} = [M^a(A,Z) - M^a(A,Z-1) - m_e]c^2 - \beta^+ \text{-распад}, \quad (16б)$$

$$E_{e^-} = [M^a(A,Z) + m_e - M^a(A,Z-1)]c^2 - e\text{-захват}, \quad (16в)$$

где M^a - массы ядер, m_e - масса электрона. Так как табулируются массы или избытки масс атомов, то для энергий бета-распадов можно записать

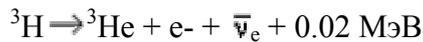
$$E_{\beta^-} = [M^{at}(A,Z) - M^{at}(A,Z+1)]c^2 - \beta^- \text{-распад}, \quad (17a)$$

$$E_{\beta^+} = [M^{at}(A,Z) - M^{at}(A,Z-1)]c^2 - 2m_e c^2 - \beta^+ \text{-распад}, \quad (17б)$$

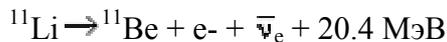
$$E_{e^-} = [M^{at}(A,Z) - M^{at}(A,Z-1)]c^2 - e\text{-захват}, \quad (17в)$$

где M^{at} - массы атомов. (Здесь мы пренебрегли разностью энергий связи электронов в начальном и конечном атомах.) Выделяющуюся в результате β -распада энергию в основном уносят легкие частицы - лептоны (электрон, электронное антинейтрино, позитрон, электронное нейтрино).

Энергии β -распада варьируются от 0.02 МэВ



до ~20 МэВ



Периоды полураспада также изменяются в широком диапазоне от 10^{-3} с до 10^{16} лет. Большие времена жизни β -радиоактивных ядер объясняются тем, что β -распад происходит в результате слабого взаимодействия.

Ядра, испытывающие β -распад, расположены по всей периодической системе элементов. Из формулы Вайцеккера для энергии связи ядра

$$E_{cb}(A,Z) = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 Z^2/A^{1/3} - a_4 (A/2 - Z)^2/A + a_5 A^{-3/4}, \quad (18)$$

учитывая, что от Z в основном зависят кулоновская энергия и энергия спаривания, можно получить равновесное число протонов в ядре (при фиксированном A), которое определяется максимумом энергии связи.

$$Z_{\text{равн}} = \frac{2a_4 A}{a_3 A^{2/3} + 4a_4} \approx \frac{A}{0.015 A^{2/3} + 2} \quad (19)$$

Так как $A=N+Z$, формула (19) определяет соотношение между числом протонов Z и нейтронов N для ядер долины стабильности. При $Z < Z_{\text{равн}}$ ядро нестабильно к β^- -распаду, а при $Z > Z_{\text{равн}}$ к β^+ -распаду и E -захвату. При всех A β -стабильные ядра должны группироваться вокруг значений $Z_{\text{равн}}$. Из (2) видно, что при малых A $Z_{\text{равн}} \approx A/2$ т. е. стабильные легкие ядра должны иметь примерно одинаковое количество протонов и нейтронов (роль кулоновской энергии мала). С ростом A роль кулоновской энергии увеличивается и количество нейтронов в устойчивых ядрах начинает превышать количество

протонов. На левой части **Рис.12** показаны парабола масс для ядер с нечетным $A = 125$. Стабильное ядро ^{125}Te находится в минимуме массовой параболы (соответственно в максимуме параболы для энергии связи). ^{125}In , ^{125}Sn , ^{125}Sb подвержены β^- -распаду, ^{125}I , ^{125}Xe , ^{125}Cs , ^{125}Ba - β^+ -распаду. Чем больше энергия бета-распада ядер (разность масс между соседними изобарами), тем они дальше от линии стабильности.

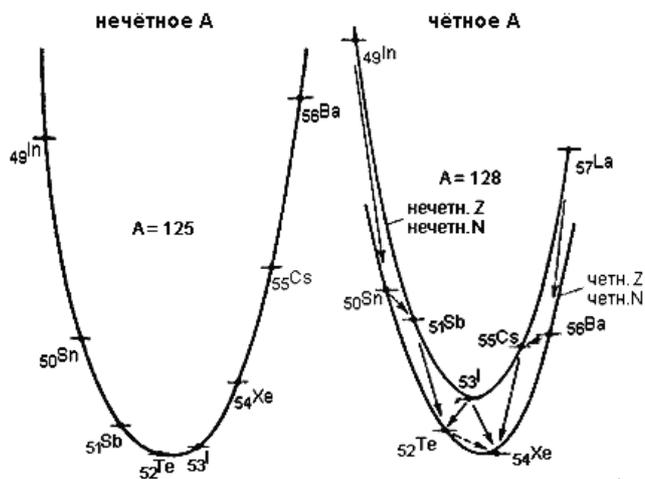


Рис.12. Параболы масс для ядер с нечетным A , и с четным A (нечетно-нечетных и четно-четных ядер)

Для четных A вместо одной параболы, за счет энергии спаривания (последний член в формуле (1)), получаются две параболы (правая часть **Рис.**): для нечетно-нечетных ядер и для четно-четных.

Несмотря на то, что энергия спаривания невелика по сравнению с полной энергией связи ядра (для ядер с $A \sim 100$ энергия связи порядка 1000 МэВ, расстояние между параболой около 2 МэВ), это приводит к важным следствиям. Некоторые нечетно-нечетные ядра (например ^{128}I) могут испытывать как β^- -распад, так и β^+ -распад и e -захват. Стабильных четно-четных ядер значительно больше, чем стабильных ядер с нечетным A и, тем более, чем стабильных нечетно-нечетных ядер, которых всего четыре (^2H , ^6Li , ^{10}B , ^{14}N). При данном A стабильных четно-четных ядер может быть несколько (например, ^{136}Xe , ^{136}Ba , ^{136}Ce). Элементы с нечетным Z редко имеют больше одного стабильного изотопа, в то время как для элементов с четным Z это не редкость (^{112}Sn , ^{114}Sn , ^{115}Sn , ^{116}Sn , ^{117}Sn , ^{118}Sn , ^{119}Sn , ^{120}Sn , ^{122}Sn , ^{124}Sn).

В результате бета-распада образуются три частицы: конечное ядро и пара лептонов. Энергия, сообщаемая ядру в силу его большой массы, мала, и ею можно пренебречь. Поэтому кинетическая энергия, выделяющаяся при бета-распаде практически целиком уносится парой лептонов, причем распределение энергий между ними может быть любым. Таким образом, энергетический спектр позитронов (электронов) и нейтрино (антинейтрино) должен быть непрерывным в интервале от 0 до E_β .

Характерной чертой всех видов бета-распада является участие в них нейтрино или антинейтрино. Впервые гипотеза о существовании нейтрино была выдвинута Паули в 1930 для «спасения» законов сохранения энергии и момента количества движения. Непрерывный характер спектра электронов (позитронов) никак не удавалось объяснить без отказа от закона сохранения энергии. Гипотеза нейтрино позволила не отказаться от столь фундаментального принципа. Прошли многие годы, пока Коуэну и Райнесу удалось зафиксировать электронное антинейтрино.

Бета-распад происходит в результате слабых взаимодействий. На кварковом уровне при бета-распаде происходит переход d -кварка в u -кварк или наоборот. На нуклонном уровне это соответствует переходам нейтрона в протон или протона в нейтрон. Причем если нейтрон может переходить в протон в свободном состоянии, то обратный переход возможен только для протонов в ядре. Бета-распады разделяются на разрешенные и запрещенные, различающиеся вероятностями переходов. К разрешенным переходам относятся переходы, при которых суммарный орбитальный момент l , уносимый электроном и нейтрино, равен нулю. Запрещенные переходы подразделяются по порядку запрета, который определяется орбитальным моментом l . Если $l=1$, то это запрещенный переход первого порядка, $l_{min}=2$ - второго порядка и т.д.

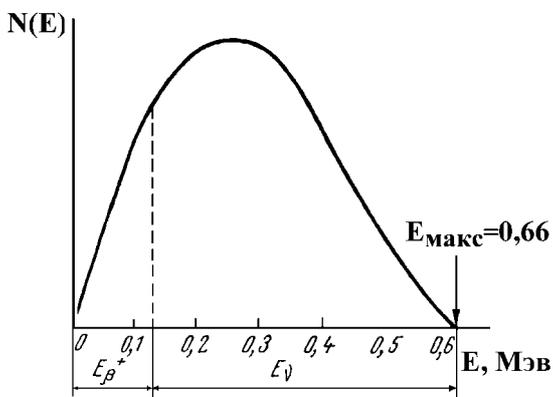


Рис.13. β^+ -спектр ^{64}Cu

При прочих равных условиях отношения вероятностей вылета частицы с орбитальными моментами $l=0$ (w_0) и $l \neq 0$ (w_l)

$$w_l/w_0 \simeq (R/\lambda)^{2l}, \quad (20)$$

где R - радиус ядра, λ - длина волны.

Бета-распады также делятся на переходы типа Ферми, при которых спины вылетающих лептонов антипараллельны, и типа Гамова - Теллера, при которых спины вылетающих лептонов параллельны. Вероятность β -перехода зависит от энергии β -распада приблизительно как E^5 .

2.2.2 Позитронный β-распад

Наряду с электронным β⁻-распадом обнаружен так называемый позитронный β⁺-распад, при котором из ядра вылетают позитрон и нейтрино. Позитрон – это частица-двойник электрона, отличающаяся от него только знаком заряда. Существование позитрона было предсказано выдающимся физиком П.Дираком в 1928 г. Через несколько лет позитрон был обнаружен в составе космических лучей.

Позитрон (от лат. *Positivus* – положительный и ...трон), (e^+) - античастица электрона. Позитрон стабилен, но в веществе из-за аннигиляции с электронами (e^-) существует очень короткое время. Позитрон образуется в процессах рождения пар e^+e^- гамма квантами, при распаде мюонов и т.д.

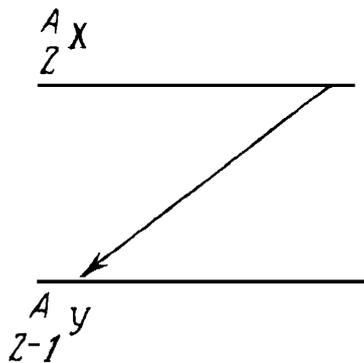
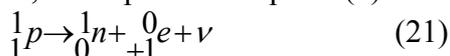
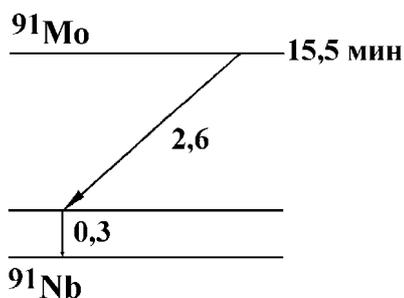


Рис.14. Схематическое изображение β⁺-распада

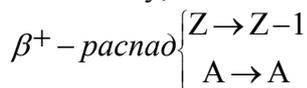
β⁺-Распад наблюдается преимущественно у искусственных радиоактивных изотопов. Позитрон отличается от электрона только положительным знаком заряда. Этот вид распада характерен для ядер, содержащих избыточное число протонов; протон ядра превращается в нейтрон, позитрон и нейтрино (ν):



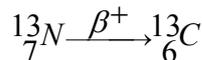
Позитронное излучение, подобно электронному, имеет непрерывный энергетический спектр с характерной величиной максимальной энергии (**Рис.13**).



При β⁺-распаде атомный номер вновь образованного ядра уменьшается на единицу, а массовое число практически не изменяется:



например,



Схематически β⁺-распад изображается стрелкой, направленной влево (**Рис.14 и 15**).

Рис.15. Схема распада ${}^{91}\text{Mo}$

Позитрон недолговечен. После замедления в веществе он соединяется с каким-либо электроном, в результате чего происходит образование двух γ-квантов с энергией 0,51 Мэв каждый. Этот процесс называется аннигиляцией. В отличие от ядерного γ-излучения, аннигиляционное излучение рождается вне ядра.

2.2.3 Электронный захват

Электронный захват – вариант β-распада, при котором захват ядром электрона с одной из атомных оболочек, чаще всего с ближайшей к ядру К-оболочки (К-захват), реже – со следующих, L- и M-оболочек (соответственно, L и M-захват).

Электронный захват так же, как и β⁺-распад, наблюдается при избыточном числе протонов в ядре. Если энергия ядра недостаточна для излучения позитрона, то оно может захватить периферический электрон атома, обычно с внутренней К-оболочки. Для таких электронов вероятность нахождения внутри ядра наибольшая. Процесс захвата электрона часто называют КС-захватом и обозначают буквами «Э. З.» или «К».

Электронному захвату соответствует превращение протона ядра в нейтрон:

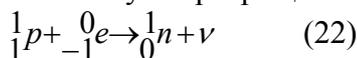
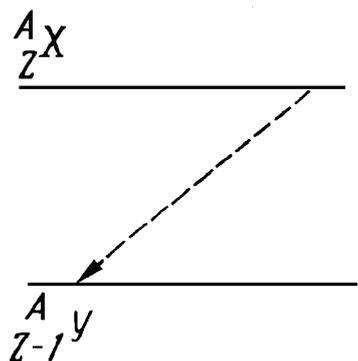
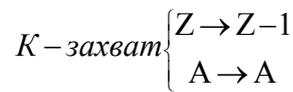
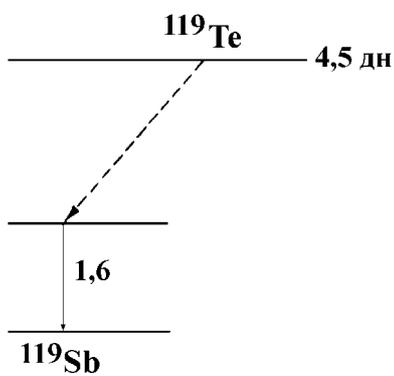


Рис.16. Схематическое изображение К-захвата

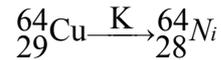


При этом атомный номер нового радиоактивного ядра, как и при позитронном распаде, уменьшается на единицу, а массовое число не

изменяется:



например,



На схемах электронный захват обозначают пунктирной стрелкой, направленной влево (Рис.16 и 17).

Рис.17. Схема распада ${}^{119}\text{Te}$

В случае захвата ядром орбитального электрона образуются два продукта: конечное ядро и нейтрино. Распределение энергий между ними является однозначным, и практически вся она уносится нейтрино. Таким образом, спектр нейтрино при e -захвате при фиксированных состояниях начального и конечного ядра будет монохроматическим в отличие от бета-распада.

В результате электронного захвата в К-оболочке атома образуется вакантное место, которое занимает один из внешних орбитальных электронов. Этот переход сопровождается испусканием характеристического рентгеновского излучения образующегося дочернего атома, что и позволяет установить наличие К-захвата.

Интересным свойством электронного захвата является наличие некоторой (хотя и очень слабой) зависимости его скорости от химического состояния превращающихся атомов. Возникновение такой зависимости определяется тем, что в этом процессе ядро захватывает электрон с какой-либо из атомных оболочек, а вероятность подобного захвата определяется строением не только отдающий ядро электрон внутренней оболочки, но и (в меньшей степени) более отдалённых, в том числе и валентных оболочек. Мгновенно происходящее изменение заряда ядра при β -распаде влечёт за собой последующую перестройку («встряску») электронных атомных оболочек, возбуждение, ионизацию атомов и молекул, разрыв химических связей.

При электронном захвате возможно возникновение электронов Оже.

Оже – электроны – электроны, возникающие в результате возбуждения (ионизации) атомов с передачей безызлучательным образом энергии другому электрону (т.н. Оже - электрону), который может выйти в вакуум. Оже-эффект (открыт французом П.Оже в 1923) – явление, в котором возбуждённый атом возвращается в исходное невозбуждённое состояние путём испускания электрона с энергией, характерной для данного элемента - используется в Оже - спектроскопии.

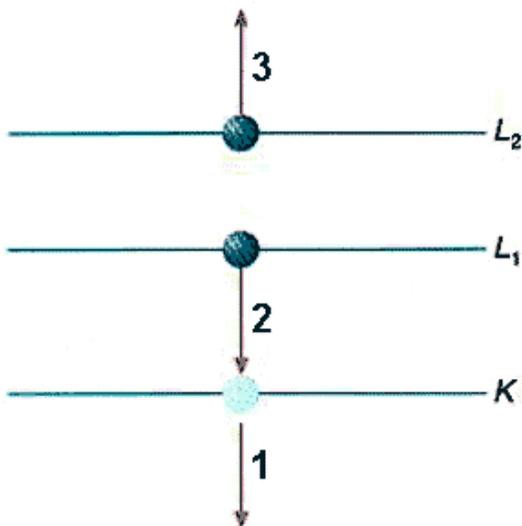


Рис.18. Схема образования электронов Оже

В ходе электронного захвата электрон удаляется с внутренней оболочки атома (например, К-оболочки). В результате этого атом ионизируется. Ионизированное состояние атома неустойчиво, атом будет находиться в нем до тех пор, пока электрон с более высокой орбиты (например, с L-оболочки) не упадет на вакансию, созданную электроном, покинувшим атом. Выделяющаяся при этом энергия может быть испущена в виде кванта характеристического рентгеновского излучения, но может быть передана третьему атомному электрону, который в результате вылетает из атома, т. е. наблюдается оже- эффект (Рис.18). Энергия может передасться, например, электрону L -оболочки, который в результате будет испущен атомом, обладая характеристической энергией, переданной ему в результате безызлучательного перехода электрона L-оболочки на вакансию в К-оболочке. Этот электрон называется KLL-оже-электроном.