

**Обязательные вопросы для допуска к экзамену по курсу «Физика атомного ядра и частиц» для студентов 2-го курса**

**Ядро**

1. Выразите энергию связи ядра через его массу.

$$W(A, Z) = [Z \cdot m_p c^2 + (A - Z) \cdot m_n c^2] - M(A, Z) c^2$$

$M(A, Z) c^2$  – масса атомного ядра

$A$  – массовое число (количество нуклонов)

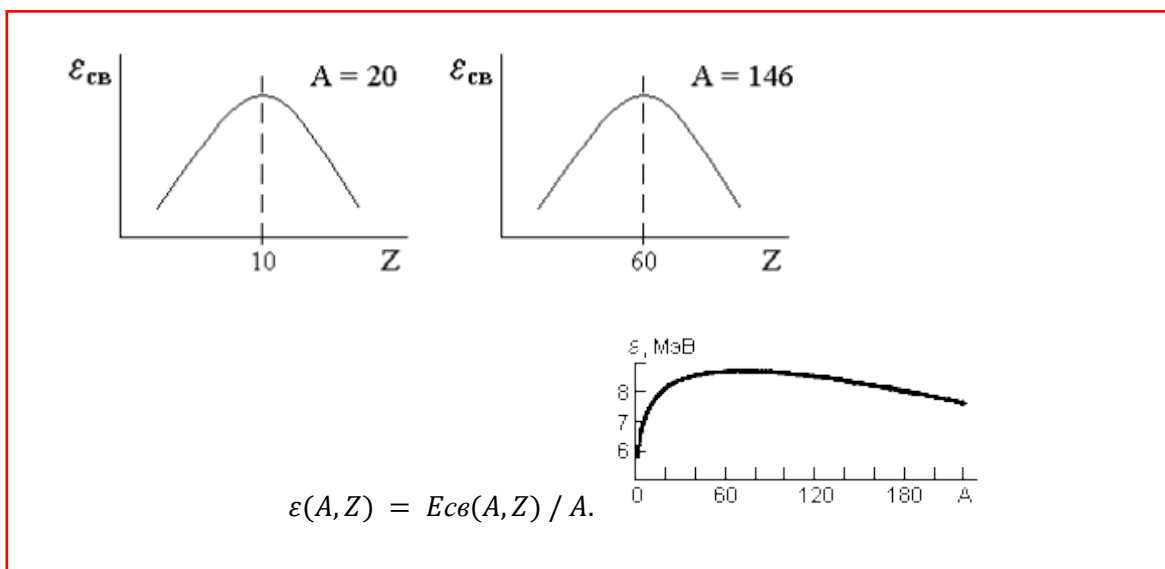
$Z$  – зарядовое число

2. Чему равна масса покоя протона, нейтрона в МэВ?

$$m_p c^2 = 938,27 \text{ МэВ}$$

$$m_n c^2 = 939,57 \text{ МэВ}$$

3. Как зависит удельная энергия связи стабильных ядер от атомного номера  $Z$ ?



4. Выразите кинетическую энергию  $\alpha$ -частицы при  $\alpha$ -распаде через массы начальных и конечных ядер.

$$\begin{cases} Q_\alpha = T_\alpha + T_{A-4} \\ P_\alpha = P_{A-4} \end{cases} \quad Q_\alpha = W(A-4) + W_\alpha - W(A)$$

$$P = \sqrt{2Tm} \Rightarrow \frac{T_\alpha}{T_{A-4}} = \frac{m_{A-4}}{m_\alpha}$$

$$T_\alpha = Q_\alpha \frac{m_{A-4}}{m_\alpha + m_{A-4}} \approx Q_\alpha \frac{A-4}{A}$$

$$(T_{A-4} = Q_\alpha \frac{m_\alpha}{m_\alpha + m_{A-4}} \approx Q_\alpha \frac{4}{A})$$

5. Почему при делении тяжелых ядер выделяется энергия?

В реакциях деления тяжелых ядер увеличивается удельная энергия связи. (График к 3 вопросу)

6. Почему в реакциях синтеза легких ядер выделяется энергия?

В реакциях синтеза легких ядер увеличивается удельная энергия связи.

7. Выразите энергию отделения нейтрона (протона,  $\alpha$ -частицы) через энергии связи начального и конечного ядер.

Энергия связи вычисляется по формуле (в системе  $E = m$ )

$$W(A, Z) = Z * m_p + (A - Z) * m_n - M_{\text{ядра}}$$

А энергию, необходимую для совершения реакции, можно записать как  $-E_{\text{выделившаяся}} = E_{\text{необходимая}} = -(M_{\text{стало}} - M_{\text{было}}) = M_{\text{было}} - M_{\text{стало}}$

Исходя из этого,

а) Отделение нейтрона  ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-1}_ZY + {}^1_0n$ :

$$E_{\text{отделения нейтрона}} = W(A - 1, Z) - W(A, Z)$$

б) Отделение протона  ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-1}_{Z-1}Y + {}^1_1p$ :

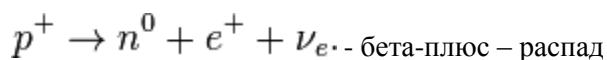
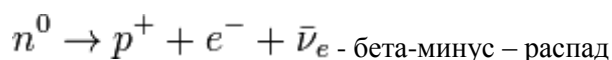
$$E_{\text{отделения протона}} = W(A - 1, Z - 1) - W(A, Z)$$

в) Отделение  $\alpha$ -частицы  ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2He$ :

$$E_{\text{отделения альфа-частицы}} = W(A - 4, Z - 2) - W(A, Z)$$

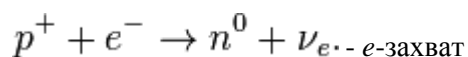
$$+W(4,2)$$

8. Какой вид имеет спектр электронов и нейтрино при  $\beta^+$  или  $\beta^-$ -распаде?



Спектр электронов и нейтрино непрерывен, так как в реакции 3 продукта.

9. Какой вид имеет спектр нейтрино при  $e$ -захвате?

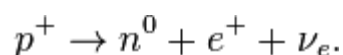


2 продукта, спектр дискретный. Исходя из законов сохранения импульса и энергии, применяемых в системе центра инерции реагентов, нейтрино уносит практически всю выделившуюся при распаде энергию.

10. Почему  $e$ -захват сопровождается рентгеновским излучением?

Очевидно, при  $e$ -захвате выделяется больше энергии, чем при бета-минус - распаде (грубо говоря,  $M_{стало} - M_{было}$  стало больше аж на две массы электрона). Но это неважно. Просто при  $e$ -захвате выделяется много энергии. Поэтому атом при электронном захвате переходит в возбуждённое состояние с внутренней оболочкой без электрона (с вакансией на внутренней оболочке). Снятие возбуждения атомной оболочки происходит путём перехода на нижний уровень электрона с одной из верхних оболочек, причем образовавшуюся на более высокой оболочке вакансию может заполнить электрон с ещё более высокой оболочки и т. д. Энергия, выделяющаяся при этом, уносится одним или несколькими фотонами рентгеновского излучения.

11. Возможен ли  $\beta^+$ -распад для свободного протона, поясните ответ.



Нет, не может. Вспоминаем волшебную формулу:

$E_{необходимая} = M_{было} - M_{стало}$  и тот факт, что масса нейтрона чуть больше массы протона (примерно на 2,5 массы электрона), и понимаем, что для совершения бета-плюс – распада протон может взять энергию только из разности энергий связи дочернего и материнского ядра.

12. Как определяется спин/четность основных состояний ядер в одночастичной модели оболочек?

В основном состоянии ядра нуклоны одного типа объединяются в пары с противоположными по знаку  $j_z$ . Полный момент количества движения такой пары равен 0. Таким образом, если на подоболочке четное число нуклонов, то  $j_{подоболочки} = 0$ . Если число нуклонов нечётное, то один из них не связан в пару и  $j_{подоболочки} = j_{нуклона}$ .

Итак,

Для четно-четного ядра  $J^P = 0^+$

Для нечётного  $J = j, P = (-1)^l$

Для нечётно-нечётного  $|j_p - j_n| \leq J \leq j_p + j_n, P = (-1)^{l_p + l_n}$ .

13. Определите спин и четность основного состояния ядер  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^5\text{He}$ ,  ${}^5\text{Li}$ ,  ${}^{15}\text{O}$ ,  ${}^{17}\text{O}$ .

Очевидно, что спин-четности  ${}^3\text{H}$  и  ${}^3\text{He}$  определяются протонной (нейтронной) дыркой в состоянии  $1s_{1/2}$  относительно четно-четного ядра гелия-4. Тогда спин равен спину недостающего нуклона, т.е.  $1/2$ , а четность равна  $p = (-1)^l = (-1)^0 = +1$ , т.к. орбитальный момент на  $s$ -орбитали 0. Аналогично, у  ${}^5\text{He}$  и  ${}^5\text{Li}$  есть лишний (относительно того же магического ядра) протон (нейтрон) на орбитали  $1p_{3/2}$ . Тогда спины равны  $3/2$ , а четность  $p = (-1)^l = (-1)^1 = -1$ . Аналогично с  ${}^{15}\text{O}$  и  ${}^{17}\text{O}$  – есть либо один лишний нейтрон, либо нейтронная дырка, лишний нейтрон может быть только на  $1d_{5/2}$ , орбитальный момент на  $d$ -орбитали 2, значит, спин  $5/2$ , четность  $+1$ . У  ${}^{15}\text{O}$  дырка на  $1p_{1/2}$ , тогда спин  $1/2$ , четность  $-1$ .

14. Какое максимальное число протонов может находиться в состоянии  $1p_{3/2}$ ?

По принципу Паули, максимальное число таких протонов – это число состояний протонов на этой оболочке. Состояния на одной оболочке отличаются только проекцией полного момента. Она, очевидно, лежит в пределах  $+3/2$ , и по правилам сложения квантовых векторов (Квантовая механика за час, АЗАА), проекции могут быть равны  $-3/2, -1/2, 1/2, 3/2$ . То есть, максимальное число протонов – 4.

15. Каков минимальный набор квантовых чисел для однозначного описания состояния в одночастичной модели оболочек?

Радиальное квантовое число ( $n$ ) (номер энергетического уровня) и орбитальный момент ( $l$ ).

(именно это написано в л.9, стр. 11, но как это сочетается с тем, что я написал в предыдущем вопросе, **я не знаю**) (Хоть что-то Клишкин не знает)

16. В чем заключается принцип неопределенности Гейзенберга?

(Пары чисел, которые не могут одновременно быть однозначно определенными, называются канонически сопряженными, примерами таких пар могут быть: импульс и координата, энергия и момент времени, в который она была измерена, момент количества движения и угол поворота)

Произведение двух канонически сопряженных величин не может быть меньше  $\hbar$ .

17. В чем заключается принцип запрета Паули? К каким частицам он применим?

В системе тождественных фермионов в одном состоянии (с одинаковым набором квантовых чисел) может быть не более одной частицы.

18. Чему равен характерный радиус действия ядерных сил?

Порядка 1 Фм.

19. Как связаны между собой радиус ядра и массовое число  $A$ ?

Радиус ядра  $R$  пропорционален массовому числу  $A$  в степени  $1/3$ :

$$R = (1.0 \div 1.1) \cdot A^{1/3} \text{ Фм.}$$

20. Чему равно характерное время сильного взаимодействия?

Характерное время, за которое происходят элементарные процессы, вызываемые сильным взаимодействием, составляет  $10^{-23}$  -  $10^{-24}$  сек

нет,  $10^{-21}$  :-  $10^{-24}$  с

21. Какую симметрию отражает квантовое число изоспин?

Изоспин  $I$  – одна из квантовых характеристик (квантовых чисел) адронов, описывающая их симметрию относительно сильных взаимодействий.

22. Как изменяется величина отношения числа протонов к числу нейтронов в зависимости от массового числа  $A$  для стабильных ядер?

Для ядер долины стабильности характерно следующее отношение числа нейтронов к числу протонов:

$$N/Z = 0.98 + 0.015 \cdot A^{2/3}$$

Легкие стабильные ядра ( $A < 40$ ) имеют приблизительно равные числа нейтронов и протонов. В области более тяжелых ядер отношение числа нейтронов к числу протонов начинает возрастать и достигает величины 1.6 в районе  $A = 250$ .

23. Определите тип и мультипольность  $\gamma$ -квантов для переходов из  $2^+$  в  $1^-$ ; из  $1^-$  в  $0^-$ . Укажите наиболее вероятные.

а)  $2 - 1 \leq J \leq 2 + 1 \implies 1 \leq J \leq 3; J = 1, 2, 3.$

$$P = (+1) \cdot (-1) = (-1)$$

Соответственно, возможно излучение квантов следующих типов и мультипольностей:

E1, M2, E3. Наиболее вероятный из них – E1.

б)  $1 - 0 \leq J \leq 1 + 0 \implies J = 1.$

$$P = (-1) \cdot (-1) = +1.$$

Соответственно, искомый квант будет иметь тип и мультипольность M1. Он же, в чем нетрудно убедиться, наиболее вероятный из одного возможного варианта.

24. Напишите закон радиоактивного распада.

Ну, например, в дифференциальном виде:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

И в экспоненциальном:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

25. Чему равно среднее время жизни свободных протона и нейтрона?

Время жизни протона:  $\infty$  (не менее  $2,9 \cdot 10^{29}$  лет) **нет,  $10^{32}$  лет**

Время жизни нейтрона:  $\sim 14.5$  минут **=880 с**

26. Как связаны между собой постоянная распада, среднее время жизни и период полураспада?

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \text{ закон радиоактивного распада}$$

Где  $\lambda$ - постоянная распада (вероятность распада в единицу времени)

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \text{ среднее время жизни}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \text{ постоянная полураспада}$$

27. Что такое ядра-изотопы? Приведите пример.

Разновидность атомов и ядер, **зарядовые числа которых одинаковы** при различных массовых числах. Пример:  $O_8^{16}$  и  $O_8^{15}$

28. Что такое ядра-изобары? Приведите пример.

Это ядра, имеющие **одинаковое массовое число**. Пример:  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{40}\text{Ca}$

29. Состав, спин и четность  $\alpha$ -частицы. Стабильна ли  $\alpha$ -частица?

Альфа частица- положительно заряженная частица, состоящая из двух протонов и двух нейтронов. Имеет **спин-четность  $0^+$** . Стабильна, как режим Путина, ибо это **магическое ядро**.

30. Напишите формулу Резерфорда.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{2mv^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\Theta}{2}}$$

формула для дифференциального эффективного сечения рассеяния нерелятивистских заряженных частиц в телесный угол  $\Omega$  в кулоновском поле другой неподвижной заряженной частицы или ядра (мишени)

31. Какой процесс используется в атомных электростанциях для получения энергии?

Деление тяжелых ядер. Обычно  $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{231}_{90}\text{Th} + ^4_2\text{He}$ ;  $^{233}_{92}\text{U} \rightarrow ^{229}_{90}\text{Th} + ^4_2\text{He}$ ; или  $^{239}_{94}\text{Pu} \rightarrow ^{235}_{92}\text{U} + ^4_2\text{He}$ ; ?

### Частицы

1. Связь между частотой, длиной волны, волновым вектором импульсом и энергией фотона.

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad c = \lambda\nu$$

только гамма

$$E = h\nu, \quad E = \frac{hc}{\lambda}, \quad E = \frac{hck}{2\pi} = \hbar kc$$

2. Что такое коллайдер? Привести примеры образования частиц на коллайдере.

Коллайдер – ускоритель на встречных пучках.

$$e^+ + e^- \rightarrow p + \bar{p}$$

$$p + \bar{p} \rightarrow \bar{\Lambda} + \Lambda$$

$p + (-p) \rightarrow Z$   
открытие Z-бозона

3. Какую минимальную энергию должны иметь  $e^+(e^-)$  в коллайдере для реакции  $e^+ + e^- \rightarrow p + \bar{p}$

$$T_p = \frac{1}{2}(2m_p - 2m_e)c^2 = 938,27 - 0,5\text{МэВ} = 937,77\text{МэВ}$$

4. Сравните константы сильного, слабого и электромагнитного взаимодействия при низких энергиях.

$$1 > \frac{1}{137} \approx 10^{-2} > 10^{-6}$$

(s, w, e)

5. Каков характерный радиус действия слабых сил?

$10^{-16} \text{ см.}$

6. В каких взаимодействиях сохраняется пространственная четность?

Сильное и электромагнитное.

7. В каких взаимодействиях может нарушаться пространственная четность?

Пространственная чётность соответствует инверсии пространства: координаты меняются на противоположные.

Внезапно, в слабых.

8. Какие частицы переносят сильное взаимодействие?

Глюоны.

9. Какие частицы переносят слабое взаимодействие?

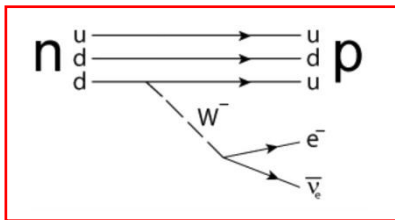
$W^\pm, Z$ -бозоны.

10. Какая частица переносит электромагнитное взаимодействие?

Гамма-квант.

11. Нарисуйте кварковую диаграмму распада нейтрона.

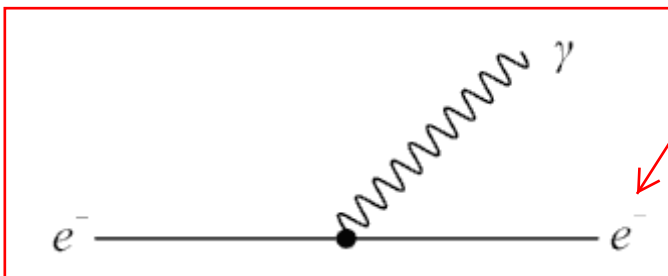
Бета-минус – распад:  $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$



12. Привести примеры возможных элементарных узлов диаграмм Фейнмана с испусканием  $\gamma$ -кванта.

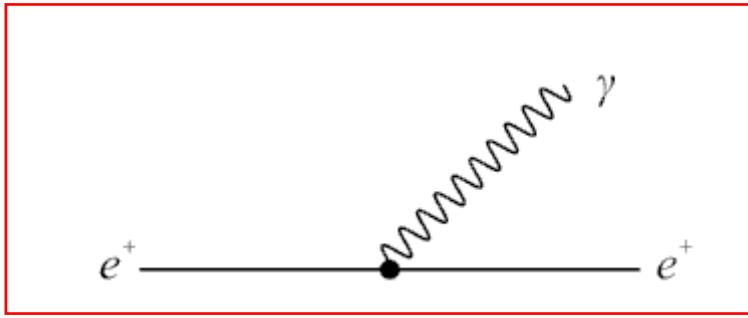
Всё нижеперечисленное в этом пункте – фундаментальные вершины Э-М взаимодействия, обязательное условие для этих вершин – фермион  $\rightarrow$  фотон, фермион.

Испускание фотона электроном

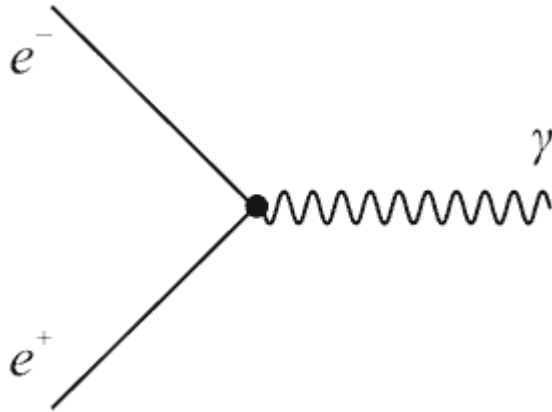


может быть  
заряженный кварк

Внимание! Для позитрона диаграмма такая же, несмотря на то, что он движется по оси времени в противоположном направлении!



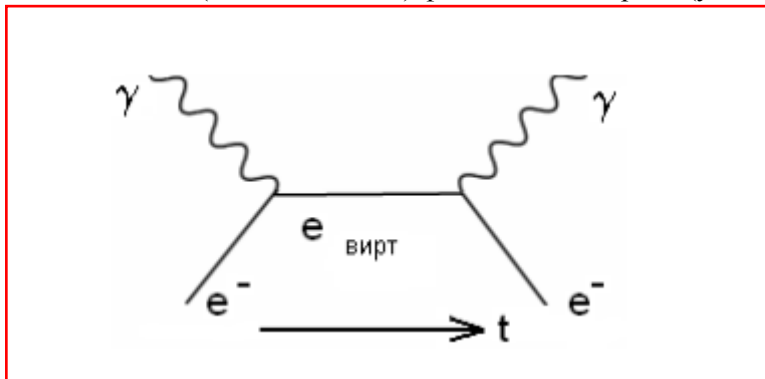
Аннигиляция электрон-позитронной пары.



ЗАПРЕЩЕНА!  
должно быть  
более 1 фотона

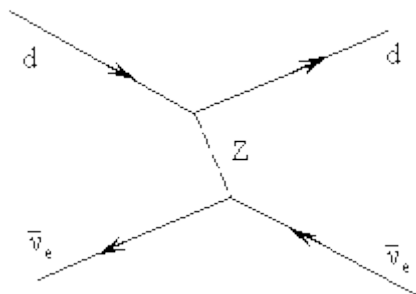
Запрещена законом сохранения импульса. Может быть только двухфотонная аннигиляция. Хотя это необходимо уточнить.

Рассеяние (Комптоновское) фотона на электроне (уже не узел, но всё же).



13. Привести примеры возможных элементарных узлов диаграмм Фейнмана с испусканием Z-бозона.

Электронное антинейтрино  $\bar{\nu}_e$  может рассеиваться на d-кварке с участием Z-бозона.

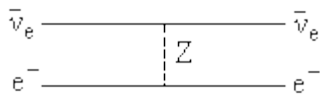


Аналогичный вид имеет диаграмма рассеивания  $\bar{\nu}_e$  на u-кварке.

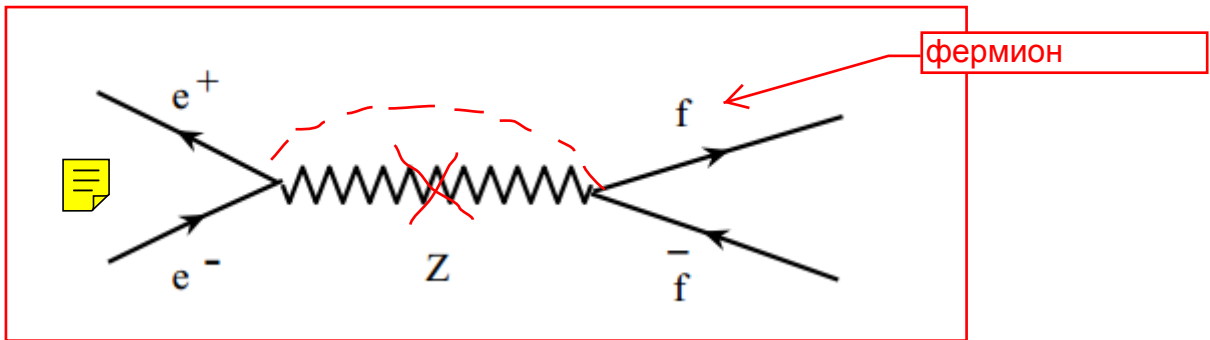


Из семинаров: такая же диаграмма, как и выше, но реагенты:  $e^-$  и  $P_q$ , продукты:  $e^+$  и  $\bar{P}_q$ , это электрон, позитрон и любая пара кварк-антикварк.

Ещё:

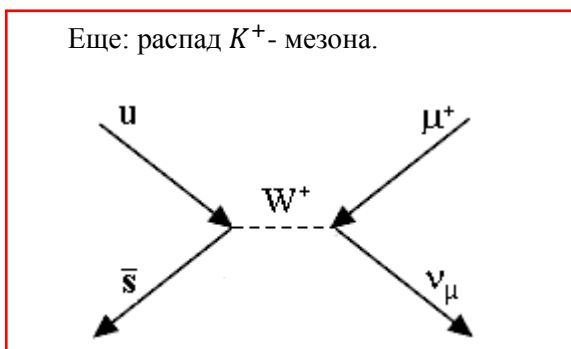
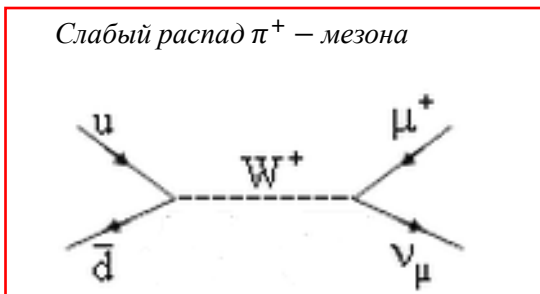


В принципе, вот обобщенная (и повернутая на  $90^\circ$ ) картина, в которой появляется Z-бозон.  $f, \bar{f}$  - фермион и антифермион. Напоминаю, что фермионы – частицы с полуцелым значением спина (кварки, нейтроны, протоны, лептоны: электроны, мюоны, тау-лептоны, нейтрино).



14. Привести примеры возможных элементарных узлов диаграмм Фейнмана с испусканием  $W^+$ -бозона.

Нам нужна только левая часть диаграммы.

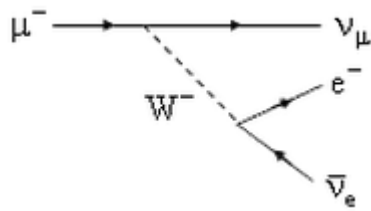


15. Нарисовать диаграмму Фейнмана распада мюона.

Мюон (от греческой буквы  $\mu$ , использующейся для обозначения) в стандартной модели физики элементарных частиц — неустойчивая элементарная частица с отрицательным электрическим зарядом и спином  $1/2$ .

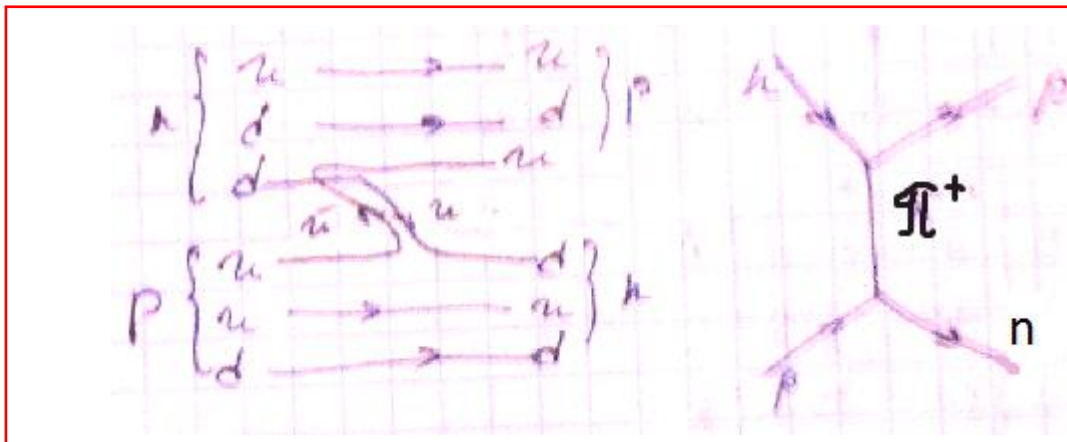
Распад мюонов:

$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$
$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$



Аналогично можно нарисовать распад  $\mu^+$ . Прodelайте это дома в качестве тренировки. Только переносчик взаимодействия там  $W^+$ -бозон. Это легко понять и запомнить: “Z” for zero charge, “W” for weak interaction (but they have charge!). And one ring to rule them all, ara

16. Нарисуйте диаграмму взаимодействия нейтрона и протона путем обмена мезонами



мезон (B=0):  
q(-q)  
мезон - тоже  
бозон (J-цел)

17. Привести примеры аннигиляции пары частица-античастица.

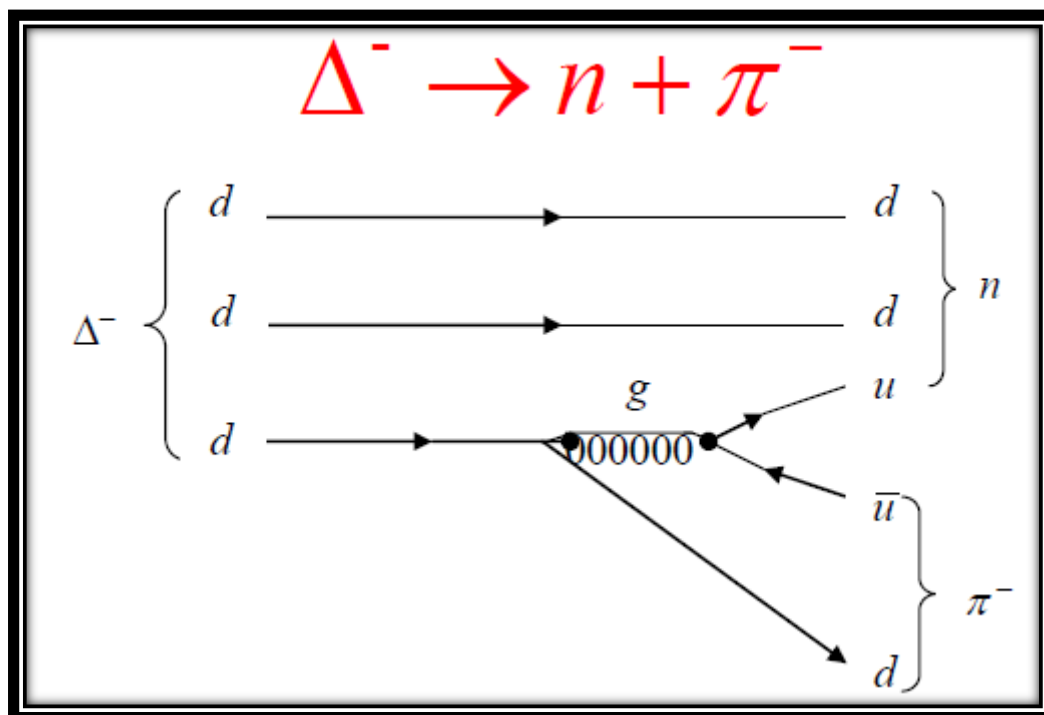
Аннигиляция - физический процесс, при котором частица и соответствующая ей античастица превращаются в фотоны или другие частицы - кванты физических полей другой природы. Например, при столкновении электрона  $e^-$  и позитрона  $e^+$  они исчезают, превращаясь в фотоны. При столкновении протонов и антипротонов образуется 5-6  $\pi$ -мезонов.

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

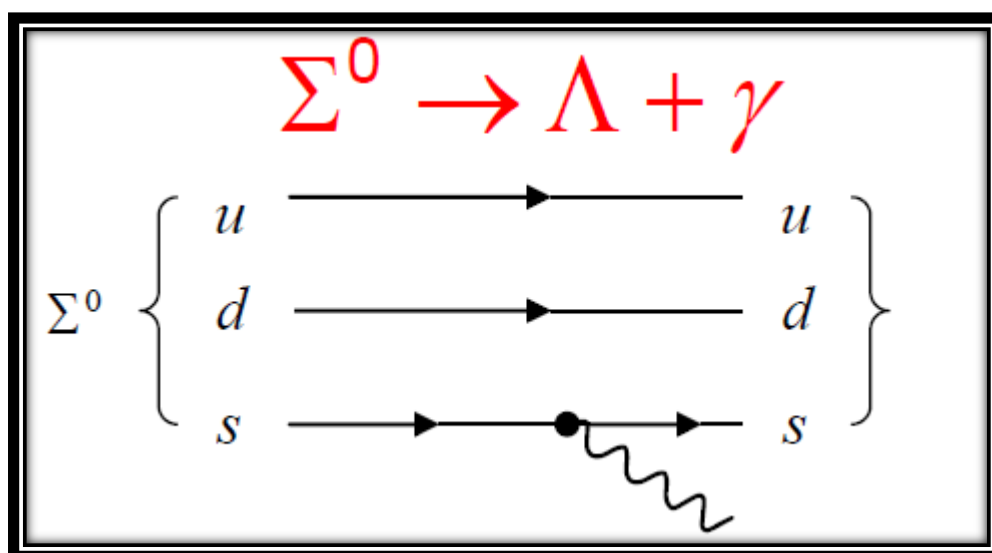
$$p + \bar{p} \rightarrow (5 - 6)\pi$$

18. Привести примеры сильных, слабых и электромагнитных распадов адронов.

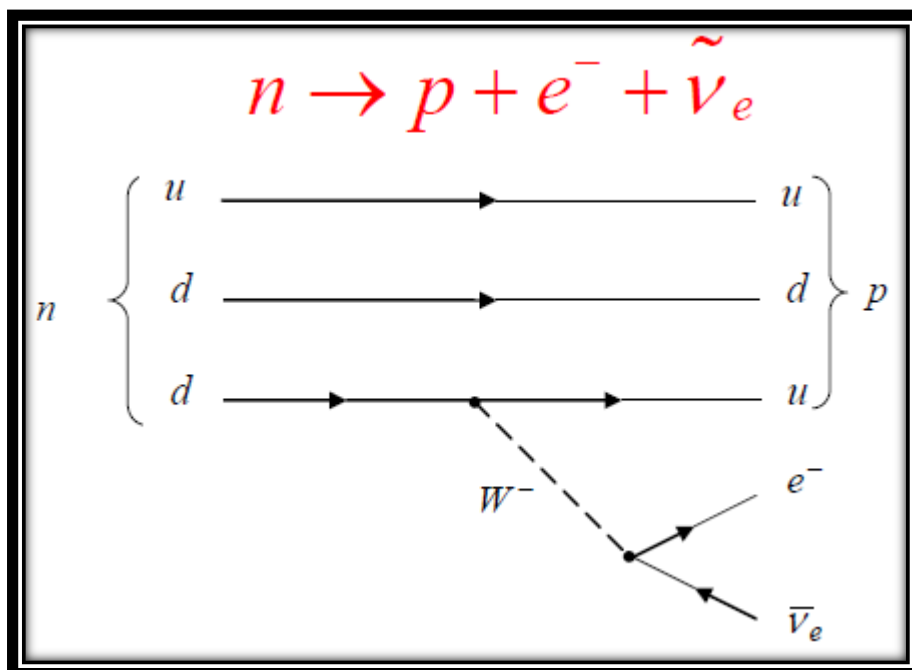
**За счет сильного:**



За счет электромагнитного:



За счет слабого:



фунд - лептоны и кварки (считаются бесструктурными)

19. Выпишите фундаментальные частицы стандартной модели.

Согласно стандартной модели, всё вещество состоит из **12** фундаментальных квантовых полей спина  $\frac{1}{2}$ , квантами которых являются фундаментальные частицы-фермионы, которые можно объединить в три поколения фермионов: **6 лептонов (электрон, мюон, тау-лептон, электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино)**, **6 кварков (u, d, s, c, b, t)** и 12 соответствующих им античастиц.

Какие квантовые числа совпадают, а какие не совпадают у фундаментальных частиц и античастиц?

← +ИЗОСПИН

У частицы и античастицы **совпадают массы, спины, времена жизни**. Если частица характеризуется и другими внутренними квантовыми характеристиками, имеющими знак, то у **античастицы величины этих характеристик те же, но знаки противоположны**. Если частица нестабильна (испытывает распад), то нестабильна и античастица, причём времена жизни у них совпадают и совпадают способы распада (с точностью до замены в схемах распада частиц на античастицы).

20. Кварковый состав протона, нейтрона.

Протон – uud (2 верхних, 1 нижний)  
Нейтрон – ddu (2 нижних, 1 верхний)

21. Привести примеры кварковых составов странного мезона и странного бариона.

Не знаю, что конкретно тут имеется в виду; вероятно, какой-либо мезон (барион), в состав которого входит странный кварк/антикварк. Ну ок.

Мезон  $K^+$  (имеет странность +1):

$$K^+ = u\bar{s}$$

Барион  $\Sigma^+$  (имеет странность -1):

$$\Sigma^+ = uus$$

22. Кварковый состав  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$  мезонов.

$$\pi^0 = u\bar{u} - d\bar{d}$$

$$\pi^+ = u\bar{d}$$

$$\pi^- = d\bar{u}$$

23. Как действует оператор пространственной инверсии?

Операция пространственной инверсии  $P$  заключается в следующем преобразовании координат частиц:

$$x, y, z \xrightarrow{P} -x, -y, -z \quad \text{или} \quad \hat{P}\psi(x, y, z) = \psi(-x, -y, -z)$$

24. Как действует оператор зарядового сопряжения?

$$\hat{C} | \text{част} \rangle = | \text{античаст} \rangle$$

Операция зарядового сопряжения  $\hat{C}$  переводит частицы в античастицы, т.е. меняет знаки зарядов, оставляя неизменными пространственные переменные  $x$ , импульс  $p$  и момент импульса  $J$ .

$$x, p, J, Q, B, Le, L\mu, L\tau, s, c, b, t \xrightarrow{\hat{C}} x, p, J, -Q, -B, -Le, -L\mu, -L\tau, -s, -c, -b, -t$$

25. Как действует оператор обращения времени?

Операция обращения времени сводится к замене  $t \rightarrow -t$ . Пространственные координаты  $\vec{r}$ , импульс  $\vec{p}$  и момент импульса  $\vec{J}$  преобразуются следующим образом:

$$\vec{r} \rightarrow \vec{r}, \quad \vec{p} \rightarrow -\vec{p}, \quad \vec{J} \rightarrow -\vec{J}.$$

26. Привести примеры истинно нейтральных частиц. **не меняются при зарядовом сопряж**

Истинно нейтральными являются  $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $\eta'$ ,  $\rho^0$ ,  $\phi$  и  $\omega$ . Такие частицы имеют тождественные самим себе античастицы.

Еще Z-бозон, два бесцветных глюона и гамма-квант.

и др.  $q(-q)$

27. Как связаны между собой время жизни и ширина резонанса?

$$\tau = \frac{\hbar}{\Gamma} \quad \text{где } \Gamma \text{ - ширина резонанса.}$$