ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО

teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЧАСТИЦ

ИШХАНОВ
БОРИС САРКИСОВИЧ

ФИЗФАК МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ. РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ. СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU.

ЕСЛИ ВЫ ОБНАРУЖИЛИ ОШИБКИ ИЛИ ОПЕЧАТКИ, ТО СООБЩИТЕ ОБ ЭТОМ, НАПИСАВ СООБЩЕСТВУ VK.COM/TEACHINMSU.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Оглавление

Лекция 1. Элементарные частицы материи 11
Введение: строение материи, химические элементы. 11
Радиоактивность 12
Рентгеновские лучи 12
Электрон 13
Модель атома 13
Сечение рассеяния 15
Опыт Резерфорда. 15
Расчеты в ядерной физике. 17
Протон. 17
Нейтрон 17
Ядерные взаимодействия. 18
N-Z диаграмма атомных ядер 19
Распады. Радиоактивное семейство урана. 20
Позитрон 22
Античастицы 22
Ускорители 22
Странные частицы. 23
Лекция 2. Квантовые свойства частиц 26
Строение материи 26
Характеристики протона, нейтрона, электрона 26
История квантования 27
Волновая теория света. 27
Закон излучения Рэлея-Джинса 29
Планк. Излучение черного тела. 29
Фотоэффект 31
Эффект Комптона (1922 год) 32
Обратный эффект Комптона 33
Интерференция электронов на двух щелях. 34
Проверка гипотезы де Бройля. 35
Рассеяние на атомном ядре. 36
Соотношение неопределенности. 38

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Спин ... 38
Лекция 3. Квантовые свойства системы частиц ... 39
Как устроен мир ... 39
Взаимодействия ... 39
Рентгеновские лучи ... 41
Природа рентгеновского спектра ... 41
Модель Бора. Атом водорода. ... 42
Опыт Франка-Герца ... 43
Потенциал ионизации атома ... 44
Статистическая природа квантовых явлений. ... 45
Операторы ... 46
Оператор координаты ... 47
Оператор импульса ... 47
Оператор орбитального момента количества движения ... 48
Принцип тождественности частиц ... 48
Статистика ... 49
Лекция 4. Уравнение Шредингера ... 51
Волновая функция и операторы ... 51
Почему уравнение Шредингера содержит мнимую единицу? ... 51
Вырождение ... 53
Связанные состояния ... 55
Гамильтониан. ... 56
Классический гармонический осциллятор ... 56
Квантовый осциллятор ... 57
Прямоугольные и сферические системы координат ... 58
Орбитальный момент количества движения. Проекция орбитального момента. ... 59
Частица в поле с центральной симметрией. Полный момент количества движения. ... 61
Квантовые состояния. Учет спина. ... 61
Принцип Паули ... 62
Оболочечная модель ядра ... 62
Лекция 5. Фундаментальные взаимодействия и лептоны. ... 63
Взаимодействия. ... 63
Механизм взаимодействия частиц. ... 65

Локальное взаимодействие в точке. Виртуальные частицы. 66
Вершины электромагнитного взаимодействия. 66
Двух- и трех-фотонная $\mathbf{e^- e^+}$аннигиляция. 68
Лептоны. 69
Электрон. 69
Как открывают частицы. Открытие позитрона. 69
Открытие антинейтрино. 70
Регистрация нейтрино. 70
Тождественны ли $\boldsymbol{\nu_e}$и $\boldsymbol{\nu_e}$? 72
Спиральность 72
Мюон 73
Тау-лептон 74
$\boldsymbol{\tau}$ – нейтрино. 76
Лекция 6. Кварки. Адроны. 78
Фундаментальные частицы Стандартной модели. 78
Кварки 79
Адроны 81
Кварки. 81
Кварковая структура адронов. 82
Открывают кварки. Адронные струи. 83
Т-кварк. 84
Барионный заряд. 85
Конфайнмент. 86
Квантовые числа кварков. 87
Определение заряда кварков. 87
Барионный заряд. 88
Ароматы кварков. 89
Изоспин. 89
Изоспиновые мультиплеты. 89
Цвет. 90
Лекция 7. Взаимодействие частиц. Адроны 93
Стандартная модель. 93
Модель кварков 93

Открытие антипротона 93
Антинейтрон. 94
Четность. 96
Внутренняя четность адронов. 96
Мезоны. 97
Протоны. 98
Кварковая структура барионов. 98
Барионы 99
Фундаментальные взаимодействия. Калибровочные бозоны. 99
Взаимодействие кварков 100
q-q потенциал. 101
Цветное взаимодействие 101
$\mathbf{W}+, \mathbf{W}-$ и Z бозоны. 103
Образование W и Z бозонов. 104
Нейтральные слабые токи. 107
Проверка гипотезы цветных кварков. 108
Константа сильного взаимодействия 108
Лекция 8. Распады частиц. 109
Наблюдение резонансов. 110
Δ резонанс 110
Сильные распады адронов. 111
Электромагнитные и слабые распады. 111
Слабые распады адронов. 112
Распад s-кварка. 113
Распад c-кварка. 113
Распад b-кварка 114
Образование $\mathbf{D}$ ** резонанса в реакции $\boldsymbol{\nu\mu} + \mathbf{p}$. 115
Рождение и распад Ω - гиперона 115
Распады $\mathbf{K}+$ мезона. 116
Распад $\boldsymbol{\pi}$ -мезона 118
Спиральность. 119
Законы сохранения. 120
Упругое рассеяние электрона на протоне. 121

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Размеры протона и нейтрона. 122
Глубоконеупругое рассеяние электрона на протоне 123
Структура протона. 124
Лекция 9. Атомные ядра 126
Атомная единица массы. Дефект массы. 126
Энергия связи ядра 126
Магические числа. 128
Энергия отделения нуклона, α − частицы 129
Размер ядра 130
Ядерный потенциал 131
Магические числа 132
Спин ядра J 134
Четность ядра P 134
Силы спаривания 134
Квадрупольный момент ядра 135
Форма ядра 136
Возбужденное состояние ядра 137
Колебательные состояния сферических ядер 138
Колебательные состояния сферических ядер 138
Вращательные состояния деформированных ядер 139
Вращательные спектры бесспиновых ядер 139
Возбужденные состояния $\mathbf{2}+$ 140
Изоспин атомного ядра 141
Аналоговые состояния ядер лития и бериллия 142
Обобщенная модель ядра 142
π-мезоны, кванты ядерного поля 142
Потенциал Юкавы 143
Диаграммы N-N взаимодействий 143
Кластеры в легких ядрах 144
Экзотические ядра. Антиядра. Гиперядра 144
Лекция 10. Радиоактивность 145
N-Z диаграмма атомных ядер 145
Радиоактивность 145

Радиоактивный распад ... 145
Постоянная распада $\boldsymbol{\lambda}$ ... 146
Закон радиоактивного распада ... 146
$\boldsymbol{\alpha}$-распад ... 147
Прохождение $\boldsymbol{\alpha}$-частицы через потенциальный барьер ... 148
$\boldsymbol{\alpha}$-распад на возбужденные состояния ядра ... 150
$\boldsymbol{\beta}$-распад ... 150
Энергии $\boldsymbol{\beta}$-распада ... 153
e-захват ... 155
$\boldsymbol{\gamma}$-переходы в ядрах ... 156
Магнитные и электрические фотоны ... 157
Изомерные состояния в ядрах ... 158
Внутренняя конверсия $\boldsymbol{\gamma}$-квантов. ... 158
Резонансное поглощение $\boldsymbol{\gamma}$-квантов ... 159
Радиоактивное семейство 4n ... 160
Запаздывающие протоны $\boldsymbol{^{21}Na}$ ... 161
Распады ядер в области границы протонной стабильности ... 161
Кластерная радиоактивность ... 161
Лекция 11. Ядерные реакции ... 163
Сечение реакции $\boldsymbol{\sigma}$ и число событий N ... 165
Законы сохранения в ядерных реакциях ... 165
Закон сохранения момента количества движения J и четности P ... 167
Закон сохрнения изоспина. ... 167
Модели ядерных реакций ... 168
Составное ядро ... 168
Тепловые нейтроны ($\boldsymbol{E \leq 10}$ эВ) ... 170
Составное ядро ... 172
Прямые ядерные процессы срыва и подхвата ... 173
Взаимодействие $\boldsymbol{\gamma}$-квантов с атомными ядрами ... 175
Реакции $(\boldsymbol{\gamma, p})$, $(\boldsymbol{\gamma, n})$ на ядре $\boldsymbol{^{40}_{90}Zn}$ ... 176
Взаимодействие $\boldsymbol{\gamma}$-квантов с ядрами. Высокие энергии ... 177
Формула Резерфорда ... 178

Упругое рассеяния электрона на ядрах. Формула Мотта. 178
Столкновения релятивистских частиц 180
Лекция 12. Деление атомных ядер 182
История 182
Удельная энергия связи ядра 182
Механизм деления. 184
Энергия деления Qf. Барьер деления Bf 185
Спектр нейтронов деления 187
Изотопы урана 187
Число нейтронов деления 188
Радиоактивность осколков деления 188
Запаздывающие нейтроны деления $87Kr$ 189
Энергия деления 190
Реакции (n,f), (n,n), (n,n') на изотопах $235U, 238U$ 191
Цепная реакция деления 192
Деление естественной смеси изотопов урана быстрыми нейтронами. $92235U$ 192
Деление естественной смеси изотопов урана быстрыми нейтронами. $92238U$ 193
Деление естественной смеси изотопов урана тепловыми нейтронами 193
Формула четырех сомножителей 195
Схема гетерогенного теплового реактора 195
Воспроизводство ядерноо горючего 196
Ядерный взрыв 196
Термоядерный взрыв 198
Лекция 13. Нуклеосинтез 199
Дозвездный нуклеосинтез 200
Образование дейтерия. Протозвезда 202
α-процесс в звездах 203
Фотоядерные реакции в звездах 204
Нейтроны для s-процесса 205
Ядерные реакции синтеза в звездах различной массы 206
Нейтронизация вещества 208
Ядерные реакции в звездах. 209
Ядерные реакции в звездах 211

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Космические лучи 212
Радиоактивные семейства урана и тория 212
Трансурановые элементы 213
Сверхтяжелые элементы 214
Пучки радиоактивных ядер 215

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Лекция 1. Элементарные частицы материи

Введение: строение материи, химические элементы.

Аристотель считал, что имеется 4 стихии: огонь, вода, земля, воздух. Его доказательство состояло в следующем: возьмем стекло чистое и капнем на него каплю водички, снизу подогреваем огнем. Капелька испаряется, получается воздух, на стекле остается пятнышко. Это земля. И дальше взаимодействия этих четырех стихий и приводят к тому, что мы видим окружающий нас мир. Его противник - Демокрит говорил, что все это не так: окружающий нас мир – это пустота, в которой находятся неделимые атомы. От него мы взяли слово «атом» («неделимый»), но мы увидим, как смысл этого понятия менялся по мере того, как мы узнавали все новое об этом атоме.

Следующий шаг связан с двумя выдающимися людьми: Лавуазье и Менделеев. Лавуазье впервые составил сводную таблицу химических элементов, впервые сумел отделить химический элемент от химического соединения. Он говорил, что разные химические соединения образуются из разных первичных элементов, и составил последовательность химических элементов, выставив их в ряд от легких (водород) к более тяжелым элементам. Число элементов, которое было, - около 70.

Дальше пришла эпоха Менделеева. Менделеев решил, что правильно по мере того, как вы выбираете химические элементы, расположить их в порядке возрастания, но не линейно, а в виде таблицы, причем учитывая еще один параметр – свойство химического элемента. Сделаем так, что по вертикали будут химические элементы, обладающие одинаковыми свойствами, а в строчке – массы химических элементов будут расти. Он такую таблицу составил. Он уточнил массы химических элементов. Когда он начал их располагать в таблице, появилось 2 проблемы:

1. В некоторых случаях, правда, редких, более тяжелый элемент предшествовал более легкому. Но он исходил из того, что важна периодическая структура, важно свойство химического элемента.
2. Некоторые клетки оказались незаполненными. И он сказал, что в этих незаполненных клеточках должны быть элементы, которые мы должны еще только открыть, в частности, это элемент галлий, рубидий и т.д.

То обстоятельство, что он построил таблицу, а не ряд, сразу ограничило нам число химических элементов. Первое, что сделал Менделеев, он доказал, что число химических элементов ограничено, а не бесконечно. Второе – он предсказал свойства химических элементов.

На сегодняшний день число химических элементов, которые открыты, ровно 118 и все свойства их известны. Комитет по чистой прикладной химии утвердил название 118-го химического элемента, назвав его оганесоном в честь работ, которые были выполнены в Дубне. В Дубне был открыт самый тяжелый химический элемент под номером 118.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Радиоактивность

1896 г, Беккерель занимался люминесценцией. Светим на солнце, солнце возбуждает химический элемент, дальше помещаем в темноту и смотрим, как он высвечивается. В ходе своих экспериментов он обнаружил такую картинку (Рисунок 1).

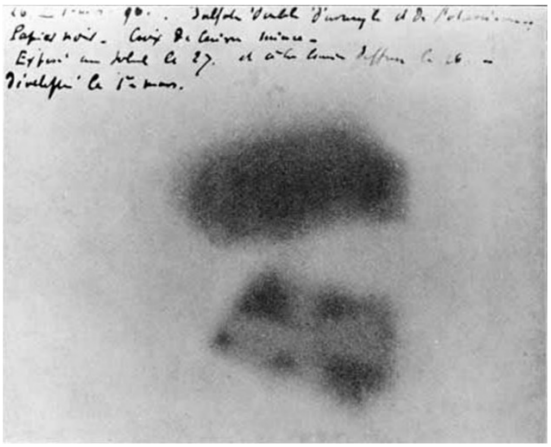


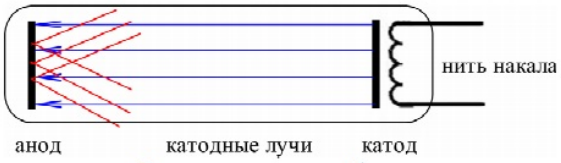
Рисунок 1. Открытие радиоактивности

Беккерель пришел в Академию наук и сказал, что обнаружил очень интересное явление, которое заключалось в том, что он видел рентгеновские лучи без источника высокого напряжения. Но на самом деле это не рентгеновское излучение, а новый тип излучения.

Рентгеновские лучи

В 1895 году Рентген проводил опыты, которые заключались в следующем (Рисунок 2): если взять трубочку, откачать из нее воздух так, чтобы немного газа осталось, приложить высокое напряжение между анодом и катодом, то анод будет светиться. Излучение, которое идет от анода, впоследствии было названо рентгеновским излучением. Рентген обнаружил, что появляется излучение, которое свободно проходит через черную бумагу.

Также в этой области работали Резерфорд, Мария Кюри, Пьер Кюри. Назвали это радиоактивностью. А в 1901 г. Рентген получил Нобелевскую премию за открытие лучей, которые названы его именем.



Рентгеновская трубка

Длина волны рентгеновского излучения $3 \cdot 10^{-9} - 10^{-10}$ м.
Длина волны видимого излучения $4 \cdot 10^{-7} - 8 \cdot 10^{-7}$ м.

Рисунок 2. Опыты Рентгена

Электрон

Дальше возникла проблема: экран светится, когда на него падают рентгеновские лучи, а что они собой представляют, откуда берутся? Тогда Томсон в 1897 году решил сделать следующее: он взял ту же самую трубку, но немного ее модифицировал (Рисунок 3). В аноде он сделал дырку, сквозь нее рентгеновские лучи проходили, дальше располагался конденсатор, на котором было положительное и отрицательное напряжение, было магнитное поле. Он обнаружил, что на экране получается точный отпечаток дырочки, которая была.

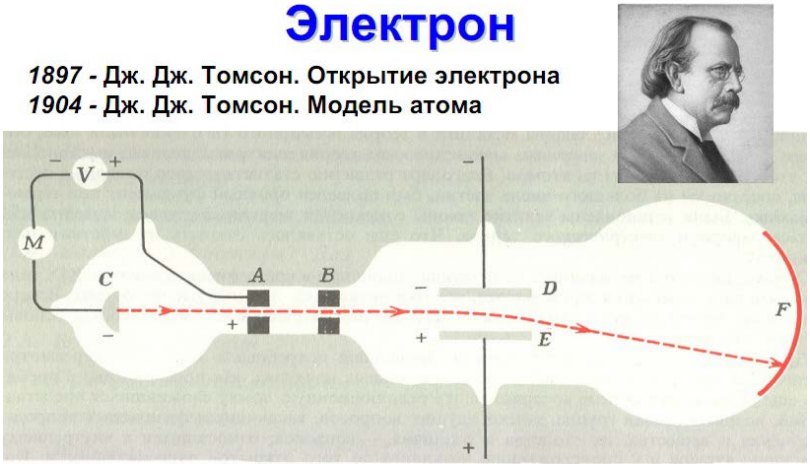


Рисунок 3. Опыты Томсона по открытию электрона.

Далее, изменяя электрическое поле, изменяя магнитное, он открыл новую частицу, названную электроном. В чем важность этого открытия:

1. Он менял разные катоды, и он обнаружил, что из всех катодов вылетают одни и те же частицы. Это означает, что во всех атомах присутствует частица, которую из этого атома можно вырвать. Этой частицей является электрон.
2. Раз есть атом, в нем есть электроны, а размер атома 10^{-8} см, то можно построить модель атома.

Модель атома

Томсон построил модель: атом – это капелька, положительно заряженная, в этой капле плавают электроны.

Почему некоторые атомы более устойчивые? Потому что устойчивая структура электронов в атоме. Длина излучения соответствует размеру 10^{-8}. Остался один открытый вопрос: что из себя представляет эта капелька? Откуда она взялась?

Резерфорд, ученик Томпсона, занимался тем, что пытался понять, что из себя представляют те самые частицы, которые излучаются под действием излучения, которое было названо радиоактивностью. Он брал радиоактивный источник, помещал его на тонкий слой, дальше ставил детектор, который позволял ему проследить, сколько частиц проходит через поглощающий слой, и обнаружил интересную вещь.

Если между источником, который испускает излучение, обнаруженное Беккерелем, и детектором помещать разные толщины алюминиевой фольги, то излучение делится на две большие компоненты: альфа-излучение и бета-излучение, электроны. Также обнаружили, что наряду с этим, идет еще и гамма-излучение. Альфа-частицы – ядра гелия, бета-частицы – это электроны, гамма-частицы – это фотоны, кванты света, которые имеют очень маленькую длину волны.

Резерфорд поручил Марсдену и Гейгеру сделать следующий опыт (**Рисунок 4**): взять слой золота и облучать его альфа-частицами и смотреть, как они будут рассеиваться. Он ожидал, что альфа-частицы будут свободно проходить через эти слои золота. Но наблюдение показало обратное: альфа-частицы рассеиваются назад.

Рисунок 4. Опыты по рассеянию α-частиц

Резерфорд придумал следующее объяснение: атом состоит из положительно заряженного центра, который он назвал ядром, вокруг которого вращаются электроны. Когда альфа-частица подходит к такому ядру, которое имеет нулевой радиус, чувствует сильное электрическое поле и отклоняется назад. Исходя из того, что имеется точечный ядерный центр, написал формулу для сечения рассеяния:

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

где сечение рассеяния пропорционально заряду частицы, заряду ядра, зависит от энергии, которую несет альфа-частица, и θ — это угол, под которым рассеиваются альфа-частицы.

Но этот результат противоречит классической физике. Классическая физика говорит: если вы имеете положительно заряженную частицу, электрон, который

крутится, он движется с ускорением, он должен терять энергию. Если он теряет энергию, то он падает на ядро. И никакого устойчивого атома быть не может. Но устойчивые атомы существуют. Нильс Бор сделал вывод, что атом имеет более сложную структуру. В атоме существуют устойчивые орбиты, находясь на которых электрон ничего не излучает, поэтому если электрон находится на этой орбите, атом устойчив и хоть до бесконечности может жить. А излучение будет происходить только тогда, когда электрон переходит с одной орбиты на другую. Длины волн, которые он рассчитал, когда они будут переходить с одной орбиты на другую, полностью соответствовали тому, что давали экспериментальные результаты. Таким образом, возникла модель, согласно которой атом теперь представляет из себя положительно заряженное ядро, вокруг которого располагаются электроны. Почему классическая физика не работает?

1. Объекты, которые имеют размер порядка 10^{-8} см и меньше, подчиняются не классической физике, а квантовой физике. Там свои законы.
2. Электроны не крутятся вокруг атомного ядра, они располагаются в виде облака.

Сечение рассеяния.

Если мы имеем какой-то рассеивающий центр, число частиц в этом центре, и дальше на него падает пучок частиц, то частицы будут рассеиваться. Как же будет определяться число частиц, которые будут рассеиваться на углы θ и φ (два угла).

$$\frac{dN(\theta,\varphi)}{d\Omega} = j \cdot s \cdot n \cdot l \cdot \frac{d\sigma(\theta,\varphi)}{d\Omega}$$

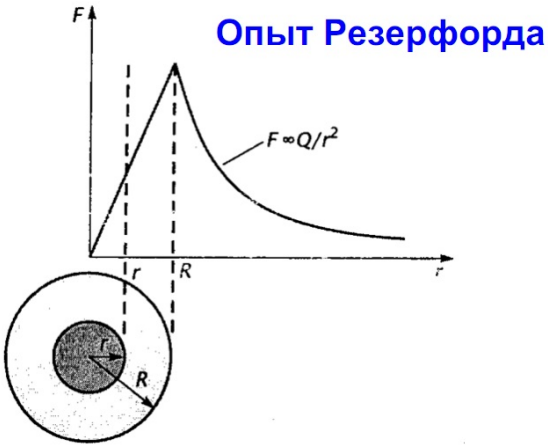
$$N = j \cdot s \cdot n \cdot l \cdot \sigma$$

N - число событий в секунду, j - поток частиц а через 1 см^3, n – число частиц b в 1 см^3, s – площадь мишени в см^2, l- толщина мишени, σ- сечение реакции.

Число частиц, которые рассеиваются, будет определяться следующим образом: число событий в секунду, под углом (θ,φ), будет определяться потоком частиц, которые падают на 1 см^2 поверхности мишени, площадью поверхности мишени (чем больше мишень, тем больше будет рассеяние), будет определяться толщиной мишени и буде определяться величиной, которая называется сечением реакции. Сечение реакции – это физическая величина, которая характеризует те процессы, которые происходят в микромире. Измеряется в см^2 или барнах.

Опыт Резерфорда.

Если у нас есть заряженная среда, на которую может падать частица (Рисунок 5), то до тех пор, пока частица находится на большом расстоянии от радиуса, сечение взаимодействия будет $F = \frac{Q}{r^2}$. Это закон Кулона. Как только пройдем через поверхность R, заряд будет уменьшаться, будет действовать только заряд, который находится внутри маленькой сферы, если находимся на радиусе r, а если находимся внутри сферы, то со всех сторон равнодействующая будет равна нулю. Поэтому на больших r идет рассеяние как на точечном заряде, при r=R закон рассеяния изменяется.



Зависимость силы, действующей на точечный заряд, от расстояния r до центра однородно заряженной сферы радиусом R.

Рисунок 5. Опыт Резерфорда

Если мы возьмем не альфа-частицы, которые брал Резерфорд, а возьмем альфа-частицы, которые мы получаем на ускорителе, будет происходить следующее (Рисунок 6).

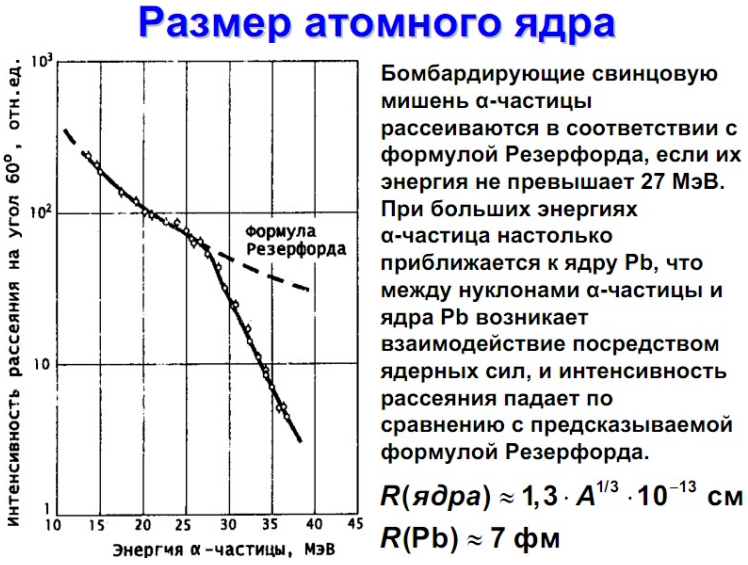


Рисунок 6. Размер атомного ядра

Если энергия альфа-частицы маленькая, а детектор расположен под углом 60^0, то альфа-частица подлетает, рассеивается на центре и уходит. Как предсказал Резерфорд, такое и будет рассеяние. Если энергия альфа-частицы увеличивается, то альфа-частица начинает чувствовать, что там находится внутри, попадает в эту область и в результате сечение начинает отличаться от классической формулы. Мы проводим измерения на большом числе ядер и получаем следующее: радиус атомного ядра выражается очень простой формулой:

$$R(\text{ядра}) \approx 1{,}3 \cdot A^{\frac{1}{3}} \cdot 10^{-13} \text{ см},$$

где A – число протонов, нейтронов, которые находятся в атомном ядре. Если мы рассчитаем по этой формуле радиус атома свинца, то получим R(Pb)≈ 7 фм. Это характерные размеры атомных ядер.

Расчеты в ядерной физике.

Мы используем размер длины – фм (ферми) = 10^{-13} см, для атомных размеров мы используем Å(ангстрем)=10^{-8} см, скорость света, заряд электрона, постоянную Планка, мы можем построить две константы:

$$\hbar c = 197 \text{ МэВ} \cdot \text{фм}$$

$$\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$$

$\hbar c$ – это примерно 200 МэВ· фм и $\frac{e^2}{\hbar c}$ — это постоянная тонкой структуры.

Используя эти величины, попробуем решить задачу. Альфа-частица (Z=2) с кинетической энергией 5МэВ испытывает лобовое столкновение с ядром золота (Z=79). Рассчитать расстояние максимального сближения альфа-частицы с ядром золота.

Из закона Кулона получаем формулу:

$$E = \frac{Z_1 e Z_2 e}{R}$$

Откуда

$R = \frac{(Z_1 Z_2 e^2)}{E} = \frac{Z_1 Z_2}{E}\frac{e^2}{\hbar c}\hbar c = \frac{2 \cdot 79}{5 \text{ МэВ}} \cdot \frac{1}{137} \cdot 200 \text{ МэВ} \cdot \text{фм} = 50 \text{ фм}$ — это расстояние, на которое альфа-частица может максимально подойти к ядру. А размер ядра порядка 7фм, то есть она подходит на расстояние примерно 10 радиусов атомов ядра и поворачивает назад.

Протон.

В 1911 году Резерфорд, облучая более легкое ядро (N=14), обнаружил следующее: из ядра вылетает протон и из одного ядра получается другое.

$$\alpha + {}^{14}_{7}N \rightarrow p + {}^{17}_{8}O$$

Протон – ядро атома водорода.

Энергия покоя протона $M c^2 = 938{,}3$ МэВ

Электрический заряд протона $Q = +1e$

Таким образом, одновременно сделано 2 выдающихся открытия:

1. Облучая альфа-частицами, мы можем изменять атомные ядра.
2. Обнаружили, что в составе атомного ядра находится протон.

Нейтрон

В 1932 году Чадвиком открыл нейтрон. Опыт впервые поставили Пьер и Мария Кюри. Они взяли ядро бериллия ${}^{9}_{4}Be$, облучали его альфа-частицами, обнаружили, что

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

из ядра вылетает какое-то нейтральное излучение, но они сказали, что из ядра вылетают гамма-кванты. Резерфорд и Чадвик перепроверили результаты.

$$\alpha + {}^{9}_{4}Be \rightarrow n + {}^{12}_{6}C$$

Энергия покоя нейтрона $Mc^2 = 939{,}6$ Мэв

Электрический заряд нейтрона $Q = 0$

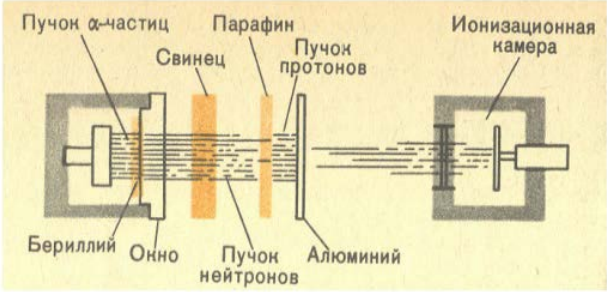


Рисунок 61. Опыт по открытию нейтрона

Чадвик взял пучок альфа-частиц (Рисунок 6), поставил бериллиевое окно, из этого окна вылетали частицы, поставил сюда свинец (свинец должен был гамма-кванты хорошо поглотить), видно, что не поглощает, что-то продолжает попадать дальше. С помощью ионизационной камеры измерили энергию и импульс частицы. Оказалось, что масса частицы такая же, как масса протона, чуть тяжелее (938,3 МэВ у протона и 939,6 МэВ у нейтрона). Тем самым был открыт нейтрон. И вопрос был решен: атомное ядро состоит из протонов и нейтронов. Профессор Московского университета Дмитрий Дмитриевич Иваненко и Шредингер создали первую модель атомного ядра, которое состояло из протонов и нейтронов.

Атомное ядро. Оно состоит из протонов и нейтронов. Z – это заряд ядра, он определяется числом протонов в ядре, и это будет определять число электронов, которое будет находиться в атоме, N – это число нейтронов в ядре, A=N+Z – это массовое число, сумма нейтронов и протонов.

Ядерные взаимодействия.

Рассмотрим альфа-частицу.

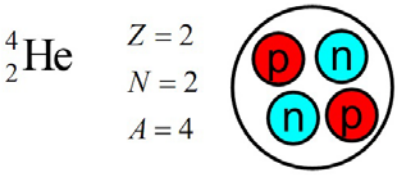


Рисунок 7. Строение альфа-частицы

Альфа-частица – это ядро атома гелия (Рисунок 7). Оно состоит из двух протонов и двух нейтронов, массовое число A=4. Мы знаем, что в природе существует два типа взаимодействия: гравитационное, электромагнитное. А протоны и нейтроны – что их притягивает? Гравитационное взаимодействие маленькое, оно не может

притянуть протоны и нейтроны. Электромагнитное взаимодействие должно растолкнуть протоны, протоны должны из ядра выскочить, а они сидят внутри атомного ядра. Оказалось, что атомное ядро связывает новый тип взаимодействия, так называемые ядерные взаимодействия, ядерные силы.

N-Z диаграмма атомных ядер

На сегодняшний день ядро, которое имеет максимальный Z, это 118. По оси Y мы откладываем число протонов в ядре, по оси X откладываем число нейтронов в ядре. Все атомные ядра, которые известны на сегодняшний день, показаны на диаграмме (Рисунок 8). Стабильные ядра, которые существуют долго, дольше времени существования Земли, находятся вдоль черной линии, также на диаграмме располагаются β^+-радиоактивные ядра (синяя зона) и β^- -радиоактивные ядра (фиолетовая зона), ядра, которые распадаются в результате α-распада (желтая зона), ядра, которые распадаются в результате деления – ядро делится само по себе на две части (принцип работы атомных станций) (зеленая зона).

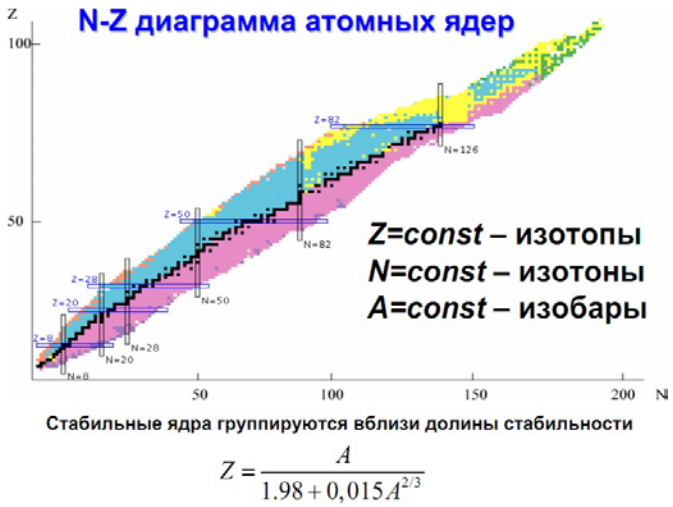


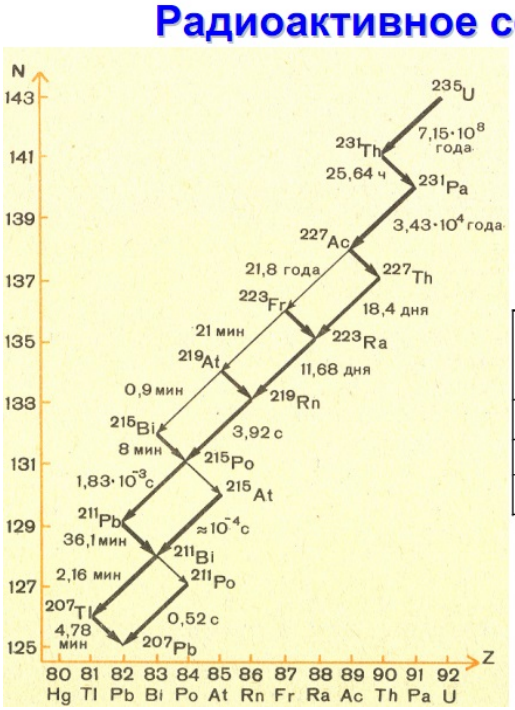
Рисунок 8. N-Z диаграмма атомных ядер

Самое легкое ядро – это ядро водорода, если водород присоединяет к себе еще один нейтрон, получается стабильное ядро с Z=1, массовое число A=2 (протон и нейтрон). Оно имеет специальное название – дейтрон. Если прицепить еще один нейтрон, будет еще одно ядро - тритий. И, наконец, ядро, состоящее из двух протонов и двух нейтронов, — это альфа-частица ($^4_2$He). Если мы проведем сечение, вдоль Z=const, то справа и слева от черной линии будут радиоактивные ядра. Ядра, которые имеют постоянное число Z, называются изотопы, постоянное число A – изобары, ядра, которые имеют постоянное число N (вертикальное сечение) – изотоны. Z у изотопов одинаковое, прицепляем нейтроны и смотрим, как меняются свойства ядер, если мы двигаемся вдоль таких линии. У изобар, когда у вас происходит β – распад, то массовое число A остается постоянным, а число протонов и нейтронов меняется.

На сегодняшний день мы знаем, что образовали искусственным образом около 3000 ядер, но, по расчетам, в природе существует около 7000 атомных ядер.

Распады. Радиоактивное семейство урана.

Теперь давайте посмотрим, что же видел Беккерель? Последнее стабильное атомное ядро – свинец и висмут, Z=82, все остальные ядра, которые существуют в природе, они радиоактивные. Они получены искусственным путем.



Изотоп	Период полураспада, лет	Содержание в естественной смеси, %
^{233}U	$1,6\cdot10^{5}$	—
^{235}U	$7\cdot10^{8}$	0,72
^{238}U	$4,5\cdot10^{9}$	99,27

Рисунок 9. Радиоактивное семейство урана

Рассмотрим изотоп урана. Z=92, массовое число A=235. Он радиоактивный, период полураспада урана ^{235}U составляет $7\cdot 10^{8}$ лет, изотоп урана ^{238}U имеет период полураспада $4,5\cdot 10^{9}$ лет. Изотоп ^{235}U, он распадается в результате α-распада, получается торий. Торий распадается в результате $\beta-$ распада, получается протактиний, и вот так все это дело последовательно распадается, и мы имеем всю цепочку атомных ядер от свинца, таллия, до урана, видите, Z=92. Вот эти все ядра, которые существуют между ураном и свинцом, они получаются из-за того, что на Земле на сегодняшний день сохранились изотопы урана и тория. Они сохранились потому, что период полураспада у них большой - 10^{5} лет, 10^{9}лет, их процентное содержание: так как тут 10^{9}лет, то 99,27% урана и примерно 0,72% ^{235}U. А этот изотоп урана, у него 10^{5} лет, он полностью распался, мы его можем получить только искусственным путем.

Рассмотрим формулу:

$$dN = -\lambda N dt$$

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

число ядер, которое распадается за время dt определяется числом ядер N в данный момент и вероятностью распада λ. Знак минус появляется, потому что число ядер все время уменьшается. Они распадаются, и число ядер будет уменьшаться.

Дальше получаем:

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t}$$

N(0)- число ядер в начальный момент времени, то есть атомные ядра распадаются по экспоненте. Дальше можем ввести два понятия. Понятие период полураспада $T_{\frac{1}{2}}$– это время, в течение которого число радиоактивных ядер уменьшается в 2 раза, и τ - среднее время жизни частицы. Эти понятия связаны между собой таким соотношением:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} \qquad\qquad \tau = \frac{1}{\lambda}$$

Если частица двигается со скоростью, большей скорости света, то у нее меняется время жизни в лабораторной системе координат (в собственной системе координат остается прежним). Решим такую задачу: рассчитать время жизни мюона (мюон – это частица, очень похожая на электрон, но имеет массу в 200 раз большую, чем у электрона, и живет поэтому $\tau \approx 2 \cdot 10^{-6}$ с). Спрашивается, какое время жизни будет иметь мюон, если он имеет кинетическую энергию $T > mc^2$ больше энергии покоя в лабораторной системе координат (m-масса мюона). Мы используем соотношения для квадрата полной энергии, и релятивистские соотношения для полной энергии E, кинетической энергии T и импульса p, которые будут определяться:

$$E^2 = c^2p^2 + m^2c^4$$

$$E = mc^2 + T$$

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Получим

$$\tau_{lab} = \frac{\tau_\mu}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \approx \tau_\mu \cdot \frac{T + mc^2}{mc^2}$$

Отсюда получаем, что его время жизни в лабораторной системе координат будет определяться его собственным временем жизни, умноженным на фактор, где T – это его кинетическая энергия, а mc^2 – это его энергия покоя. Чем больше T, тем больше живет мюон. На Землю непрерывно падают мюоны, энергия этих мюонов – ГэВы. Они живут очень долго, падают на нашу Землю, проходят сквозь земную кору, попадают в наши подземные лаборатории и создают очень большой фон. Поэтому с мюонами, которые приходят к нам, надо бороться.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Позитрон

В 1932 году Андерсон во время проведения эксперимента, видит такое событие: летит частица, камера Вильсона помещена в магнитное поле, и он видит трек от этой частицы.

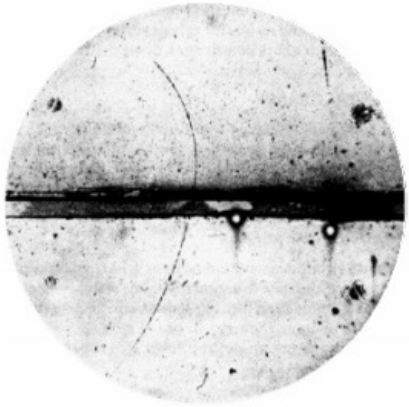


Рисунок 10. Опыт с камерой Вильсона

Он помещает в камеру Вильсона (Рисунок 10) слой свинца. Если частица проходит через слой свинца, она теряет энергию. И тогда мы сразу видим откуда летит частица, мы видим магнитное поле, которое искривляет частицу, мы его знаем. И получаем неожиданный результат. Оказывается, что в камеру Вильсона влетела частица, которая имеет такую массу, как масса электрона, но заряд у нее оказывается положительный. Позитрон имеет такую же массу, но электрический заряд противоположный, т.е. положительный. Позитрон был открыт Андерсоном. Вильсон взял камеру, заполнил ее паром и привел пар в такое состояние, что если его еще немного подогреть, то там будут образовываться капельки жидкости. Поэтому, если мы возьмем такую камеру, заполним ее паром, и частица будет пролетать, она вдоль траектории будет создавать капельки жидкости, и мы, фотографируя, их увидим.

Античастицы

В 1928 году Дирак предположил, что может существовать антимир, в котором античастицы, а дальше в 1932 году открыт позитрон, в 1955 – антипротон, в 1956 – антинейтрон, в 1966 году смогли соединить антипротон и антинейтрон и получили антидейтерий, в 1970 году – антигелий и дальше получили антиэлектрон и получился антиводород (1998 год). На 10^9 античастиц, существовало 10^9+1 частиц, частицы и античастицы аннигилировали, и осталась только одна частица, из которых мир и построен. А античастицы, которые аннигилировали, создали реликтовое излучение, которое было открыто.

Ускорители

Чтобы изучать свойства частиц, нам нужны ускорители.

Для того, чтобы родить какую-то частицу, нам нужно во взаимодействие загнать энергию. Нужно, чтобы энергия электрона и позитрона была очень большая, чтобы из этой энергии потом родились частицы. Все определяется соотношением $E = mc^2$. Существует эквивалентность между энергией и массой. Я могу сталкивать две массивные частицы электрон и позитрон и рождать гамма-кванты, и я могу из гамма-квантов рождать протоны и антипротоны. Все определяется тем, какая для этого мне нужна энергия. Существует понятие порога реакции (Рисунок 11), порог реакции определяется массой частиц, которые сталкиваются, m_1, m_2 и массами части, которые получаются, m_i.

Рисунок 11. Порог реакции

Берем протон, сталкиваем его с другим протоном, рождается антипротон и еще три протона. Именно такая реакция, потому что существует в мире закон сохранения барионного заряда. Какая мне нужна энергия, чтобы эта реакция прошла. Она определяется порогом реакции. Подставляем сюда массу протона, получаем, что порог реакции составляет примерно 6 ГэВ (5,6 ГэВ).

$$E_{порог} = \frac{(m_i - m_1 - m_2)(m_i + m_1 + m_2)}{2m_2} c^2$$

$$E_{порог} = \frac{2m_p \times 6m_p}{2m_p} = 6m_p = 5{,}6\ \text{ГэВ}$$

Таким образом, чтобы родить протон и антипротон в такой реакции, мне нужно ускорить частицу, налетающую до энергии 5,6 ГэВ.

Странные частицы.

Это некий аналог камеры Вильсона, но это пузырьковая камера. Если взять жидкость и довести ее до такого состояния, что, когда частица будет пролетать через камеру, жидкость вдоль трека будет закипать. Это предложил Глезер. Это пузырьковая камера, вдоль траектории частиц образуются пузырьки.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

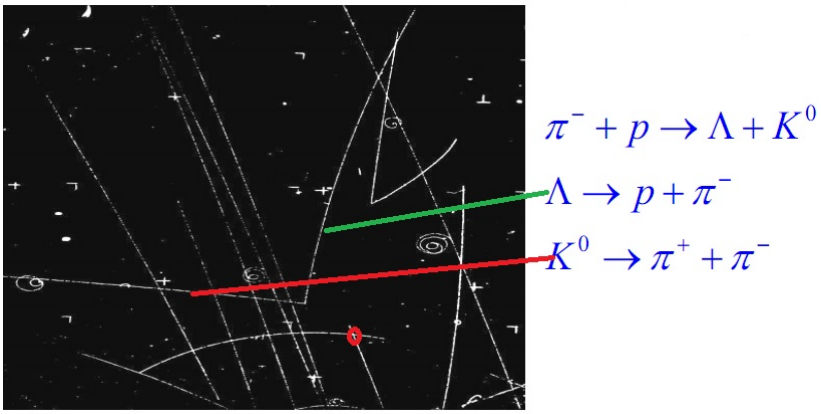


Рисунок 12. Опыт Глезера

Частица π^--мезон встретила протон, в этой точке произошла реакция, образовалась Λ-частица и K^0-мезон, они разлетелись в разные стороны и дальше распались. Это видно на картинке. Измеряя энергии и импульсы частиц, из соотношения

$$E^2 = c^2p^2 + m^2c^4$$

получаем массу частицы и по тому, как они искривляется в пузырьковой камере, я определяю ее заряд. Это способ определения масс и зарядов новых частиц. Это область элементарных частиц, которые живут очень мало - 10^{-23}с, 10^{-16}с, это элементарные частицы, проявляющиеся как резонансы.

К 60-м годам 20 века мы с вами говорим, что теперь мир элементарных частиц состоит из двух классов частиц: класс лептоны (электрон, мюон и τ – лептон) и класс адроны – это уникальные частицы, которые состоят из кварков. Адроны состоят из барионов, которые состоят из трех кварков, и мезоны, они состоят из кварка или антикварка.

Рисунок 132. Устройство мира

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Сегодня мы так себе представляем устройство атома (Рисунок 13): атомное ядро состоит из протонов и нейтронов, протоны и нейтроны состоят из кварков u и d, здесь находятся электроны

На сегодняшний день мир устроен так: он состоит из лептонов (это электрон, нейтрино, мюон, нейтрино) и кварки, 6 кварков и 6 лептонов.

ФЕРМИОНЫ

Спин $J = 1/2$

Лептоны (спин = 1/2)				Кварки (спин = 1/2)			
Аромат		Масса, ГэВ/c^2		Аромат		Масса, ГэВ/c^2	Электрический заряд
ν_e	электронное нейтрино	$<1\cdot10^{-8}$	**1 поколение**	u	up	0,003	2/3
e	электрон	0,0005111		d	down	0,006	–1/3
ν_μ	мюонное нейтрино	< 0,0002	**2 поколение**	c	charm	1,3	2/3
μ	мюон	0,106		s	strange	0,1	–1/3
ν_τ	тау-нейтрино	< 0,02	**3 поколение**	t	top	175	2/3
τ	тау	1,7771		b	bottom	4,3	–1/3

Стабильные частицы

e^- — электрон, e^+ — позитрон

p — протон, $\bar{p}$ — антипротон

? ν_e, ν_μ, ν_τ, $\tilde{\nu}_e$, $\tilde{\nu}_\mu$, $\tilde{\nu}_\tau$

Рисунок 14. Фермионы

В этом мире всего несколько стабильных (Рисунок 14) частиц: протон, электрон, антипротон, позитрон и нейтрино. Возникает вопрос, как они между собой взаимодействуют? Оказывается, в природе существует, наряду с электромагнитным и гравитационным взаимодействием, еще 2 типа взаимодействия: сильное взаимодействие, которое переносят глюоны, и слабое, которое переносят w-бозоны.

95% окружающего мира состоят из темной материи и темной энергии.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Лекция 2. Квантовые свойства частиц

Строение материи

1998 год – открыто явление: Вселенная расширяется с ускорением. Вселенная состоит из галактик. В галактике Млечный путь 100 млрд. и даже несколько больше звезд. Галактика состоит из звезд. А галактик масштаб такой же – порядка 100 млрд. галактик. Звезда, в ареале которой мы находимся, это Солнце. Солнце имеет большую массу, вокруг себя сконцентрированы планеты, на одной из них мы живем, это Земля. Вселенная, которая родилась, имела температуру $10^{19} - 10^{20}$ градусов.

Вещество устроено как матрешка. Молекулы состоят из атомов. Атом водорода, кислорода, гелия и так далее. Атомы состоят из атомных ядер и электронов, это мы тоже знаем. Электрон – это фундаментальная частица, она не имеет никакой внутренней структуры. На сегодняшний день мы знаем, что электрон имеет размер меньше, чем 10^{-18} см, и в рамках этого мы описываем электрон как точечную частицу. В отличие от этого протон имеет определенную внутреннюю структуру и состоит из кварков. Протоны и нейтроны объединились и образовали атомные ядра, ядро имеет положительный заряд, потому что протон имеет положительный заряд, они притянули к себе электроны, появилось нейтральное вещество.

Мы говорим о том, что протон, нейтрон, и частицы, которые мы образовали, - $\pi-$ мезоны, К-мезоны, Λ-частицы, $\Sigma-$ гипероны - они состоят из кварков.

Из чего же состоит Вселенная? 90% вещества состоит из водорода, 9% — это гелий, все остальные ядра, которые тяжелее, чем гелий, составляют 1%.

Характеристики протона, нейтрона, электрона

Имеется протон и нейтрон, но, чтобы образовалось атомное ядро, они должны провзаимодействовать. Их слепляют переносчики взаимодействия. Эти переносчики взаимодействия – γ-квант (переносит магнитное взаимодействие), 8 глюонов (сильное взаимодействие), W-бозон, Z-бозон (слабое взаимодействие).

Какие фундаментальные частицы находятся в ядре: это нейтрон, протон, они окружены электронами. Масса протона – 938,3 МэВ, нейтрона - 939,6 МэВ, электрон имеет массу всего 0,5 МэВ, то есть электрон легче, чем протон и нейтрон, примерно в 2000 раз. Поэтому вся масса атома сосредоточена в ядре, протоны и нейтроны окружены электронами, размеры атомного ядра 10^{-13} см, характерная величина ферми, 1фм = 10^{-13} см. Атомные ядра, окружены электронной оболочкой, характерный размер 10^{-8} см, ангстрем, 1 Å= 10^{-8} см. Различие между размером атомного ядра и атома – 5 порядков. Вот эти 5 порядков и определяют, как устроено вещество.

Вещество оказывается пустое: массивные ядра весят на большом расстоянии друг от друга, а весь промежуток заполнен электронами, которые нейтрализуют заряд атомного ядра. Несмотря на то, что электромагнитное взаимодействие очень сильное (оно на 40 порядков сильнее, чем гравитационное), но гравитационное мы ощущаем, а

электромагнитное – нет, потому что электроны его на масштабе 10^{-8} см его нейтрализовали (заряды протонов, атомных ядер нейтрализованы).

Фундаментальные частицы, кварки, они имеют еще меньший размер, порядка 10^{-18} см, это тоже частицы, которые не имеют размера, и тоже глюоны нейтрализуют этот заряд, поэтому мы кварки в свободном состоянии не видим.

Следующее свойство: частица имеет еще одну квантовую характеристику – спин. Спин протона, нейтрона, электрона равен $\frac{1}{2}$. Появляется еще одна квантовая характеристика – изоспин. У протона и нейтрона равен $\frac{1}{2}$, проекция у протона $+\frac{1}{2}$, у нейтрона $-\frac{1}{2}$, частицы имеют определенную четность (+1 у протона и нейтрона), они подчиняются статистике Ферми-Дирака. Когда вы берете систему частиц, то они начинают между собой взаимодействовать. Вот статистика – это и есть взаимодействие, как частицы между собой образуют квантовый ансамбль. Следующая характеристика – магнитный момент: у протона он равен +2,79, у нейтрона $-1{,}91$ (для нуклонов – в ядерных магнетонах). Эти числа означают, что и протон, и нейтрон не являются элементарной частицей (элементарные частицы таких чисел иметь не могут). Время жизни протона $> 10^{32}$ лет, все попытки обнаружить распад протона на сегодняшний день успеха не имели, хотя есть теории, что протон может распадаться. Пытаются понять, является ли электрон стабильной частицей или нет, время жизни $> 4{,}6 \cdot 10^{26}$ лет, то есть тоже никаких распадов электрона мы обнаружить не можем. А вот нейтрон, в связи с тем, что он тяжелее, чем протон, на 1,3 МэВ, он распадается и превращается в протон, электрон и антинейтрино электронное:

$$n \to p + e^- + \bar{\upsilon}_e$$

История квантования

Мы видим, что есть определенные квантовые числа, определенные дискретные величины, которые определяют свойства частиц.

Закон Авогадро: при одинаковых давлениях и температурах, при равных объемах в любых двух идеальных газах содержится одинаковое число частиц:

$$P_1V_1 = N_1kT_1 = P_2V_2 = N_2kT_2$$

$$N_1 = N_2$$

Если P,V и T одинаковое, то и N будет одинаковое. В 1833 году Фарадей занимался опытами по электролизу и обнаружил, что у него проходит одинаковое количество тока через электролит, то выделяется определенное количество вещества.

Волновая теория света.

Возьмем свет. Что такое свет? Когда Ньютон ставил свои опыты, он говорил, что свет – это частички вещества. Частички, имеющие разные цвета, потому что он при помощи призмы разложил цвет на составляющие цвета. Они по-разному проходят в воде, в призмах преломляются по-разному. Дальше Юнг ставил опыты (Рисунок 15) по

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

интерференции этих частиц света, и объяснил, что свет представляет из себя волну. Волновые свойства света: мы берем источник света, берем две узкие щели, свет из них идет на экран, и на нем мы видим волновую картинку.

1801 г. Т. Юнг. Волновая теория света

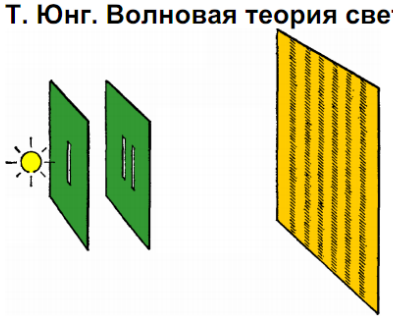


Рисунок 15. Опыт Юнга

Интерференция света (Рисунок 16): мы имеем 2 источника S_1, S_2, экран, расстояние от первого источника d_1, от второго источника d_2. Есть одна волна и вторая, мы складываем косинусы, получаем выражение для амплитуды.

Если $\varphi = 0$ разность фаз между источниками не существует, но различие возникает, потому что $d_1 \neq d_2$. В результате на экране возникает система полос. Просто это понять: вы имеете одну и вторую синусоиду, если наложить их друг на друга так, чтобы максимумы совпадали, то будете иметь яркую полоску. Если максимум будет совпадать с минимумом, то будете иметь ноль, свет погасит друг друга. Таким образом, возникает эта интерференционная картинка.

Берем кусок железа и начинаем его нагревать, чувствуем, что от куска железа идут теплые волны, но ничего не видим, кусок как был черный, так и остался. Еще увеличиваю температуру – кусок покраснел. Появилось излучение красного цвета. Еще увеличиваю температуру – кусок побелел. Температура увеличилась, длины волн, которые идут, становятся короче.

Раз поверхность излучает, то какая будет мощность излучения с единицы поверхности? Стефан и Больцман записали закон (эмпирический): мощность излучение с единицы поверхности определяется T^4, где T – температура (Рисунок 21).

$$R = \sigma T^4$$

где T – температура, а $\sigma = 5,6705 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4}$ - постоянная Стефана-Больцмана.

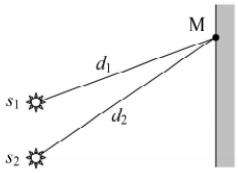
При больших длинах волн спадает излучение, при малых длинах волн тоже спадает и имеется некий максимум. Как меняется этот максимум, установил Вин. Это закон смещения Вина: положение максимума, умноженное на температуру, есть константа:

$$\lambda_m T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{м} \cdot \text{К}$$

Таким образом, если мы нагреваем тело, то оно излучает пропорционально 4 степени температуры и имеет спектр с максимумом.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Интерференция волн



$$s_1 = a\cos 2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{d_1}{\lambda}\right) \qquad s_2 = a\cos\left[2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{d_2}{\lambda}\right)-\varphi\right]$$

$$s = s_1 + s_2 = 2a\cos\left(\pi\frac{d_2-d_1}{\lambda}+\frac{\varphi}{2}\right)\cos\left[2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{d_2+d_1}{\lambda}\right)-\frac{\varphi}{2}\right]$$

Амплитуда A Интенсивность A^2

$$A = 2a\cos\left(\pi\frac{d_2-d_1}{\lambda}+\frac{\varphi}{2}\right) \qquad A^2 = 4a^2\cos^2\left(\pi\frac{d_2-d_1}{\lambda}+\frac{\varphi}{2}\right)$$

при $\varphi = 0$ разность фаз ψ возникает из-за разности хода лучей,

$$\psi = 2\pi\frac{d_2-d_1}{\lambda} = 2\pi m, \quad m \text{ — целое число}$$

$$A^2 = 4a^2\cos^2\left(\pi\frac{d_2-d_1}{\lambda}\right) = 4a^2\cos^2 m\pi$$

Рисунок 16. Интерференция света

Закон излучения Рэлея-Джинса

Рэлей и Джинс попытались описать и получили вот что (Рисунок 17):

$$u(T,\lambda) = kT\cdot n(\lambda) = 8\pi kT\lambda^{-4}$$

$$n(\lambda) = 8\pi\lambda^{-4}$$

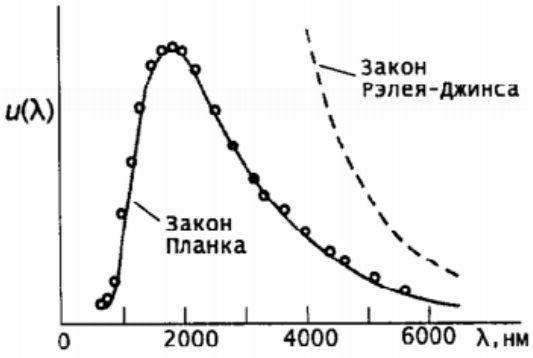


Рисунок 17. Закон Рэлея-Джинса

Когда мы идем к малым длинам волн (большим энергиям), то с одной стороны имеются экспериментальные данные, а с другой стороны закон Рэлея-Джинса ничего нам описать не может. Мы знаем, что на одну степень свободы приходится энергия kT. Когда берете объем, то, чем меньше длина волны, тем больше таких волн вы можете в объеме уложить. Умножаем на kT, получаем бесконечность.

Планк. Излучение черного тела.

Все попытки описать нагревание металла не увенчались успехом. Тогда Планк решил подогнать описание экспериментальной картинки.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Закон Планка:

$$U(T,\nu) = \frac{8\pi h\nu^2}{c^3}\frac{1}{\exp\frac{h\nu}{kT}-1}$$

$$U(T,\lambda) = \frac{8\pi hc\lambda^{-5}}{\exp\left({}^{hc}/_{\lambda kT}\right)-1}$$

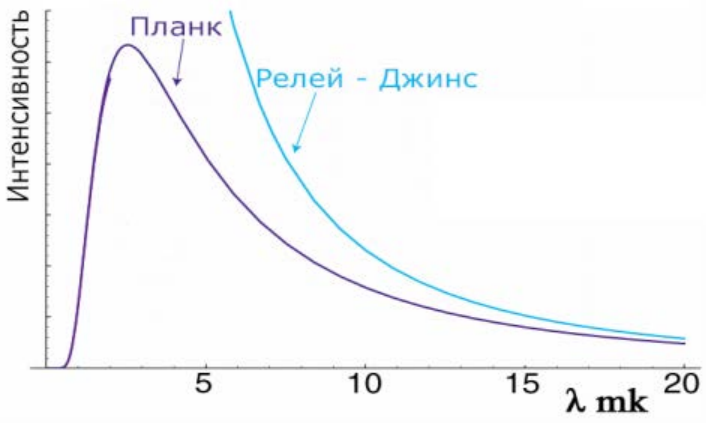


Рисунок 18. Закон Планка

$$\hbar = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\hbar = 6{,}58\cdot 10^{-22}\ \text{МэВ}\cdot\text{с}$$

Планк руководствовался следующим: он придумал, что атом излучает в виде отдельных квантов. Излучение атома связано с тем, что электроны переходят с одних оболочек на другие. Отсюда взять бесконечную энергию нельзя. Чем больше энергия, тем меньше вероятность, что частица будет излучаться.

Планк ввел постоянную Планка, ввел спектр черного тела.

Формула Планка → закон Рэлея-Джинса

$$u(\lambda,T) = \frac{8\pi hc\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)-1}$$

При больших λ $\quad x = \frac{hc}{\lambda kT} \ll 1$

$$e^x = 1 + x + \ldots$$

$$e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \approx \frac{hc}{\lambda kT}$$

$$u(\lambda,T) \to 8\pi kT\lambda^{-4}$$

совпадает с законом Рэлея–Джинса

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

И из формулы Планка получается закон Стефана-Джонса:

Формула Планка → закон Стефана-Больцмана

Полная плотность энергии $u(T)$

$$u(T)=\int u(\lambda,T)d\lambda=\int\frac{8\pi hc\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)-1}d\lambda$$

$$x=\frac{hc}{\lambda kT},\quad dx=-\frac{hcd\lambda}{\lambda^2kT},\quad d\lambda=-\frac{\lambda^2kT}{hc}dx$$

$$u=-\int\frac{8\pi hc\lambda^{-3}}{e^x-1}\left(\frac{kT}{hc}\right)dx=8\pi hc\left(\frac{kT}{hc}\right)^4\int\frac{x^3dx}{e^x-1}$$

$$\int\frac{x^3dx}{e^x-1}=\frac{\pi}{15}$$

$$u(T)=\frac{8\pi^4k^5}{15h^3c^3}T^4$$

Фотоэффект

Следующий шаг был сделан Эйнштейном в 1905 году. Началось все с того, что Герц впервые открыл электромагнитные колебания, в его честь названа единица колебания, 1 Гц. С помощью двух разрядников он возбуждал волны и между разрядниками начал помещать непроницаемый экран. Он обнаружил, что если убрать экран, то второй разрядник начинает излучать (происходит пробой) при гораздо меньшем напряжении. Если вы ставите экран, то напряжение, которое нужно подать на разрядник, больше, чтобы произошел разряд. Он понял, что из первого разрядника выходят какие-то частицы, кванты света, которые вырывают из второго разрядника электроны и, тем самым, вызывают разряд во втором разряднике. Он открыл кванты света. Но объяснил все это Эйнштейн в 1905 году явлением фотоэффекта.

Если возьмем металлическую поверхность, будем облучать ее светом, то из поверхности будут вылетать электроны.

Энергия вылетающего электрона – это разность энергии фотона, который падает на пластину, и работой выхода:

$$E = h\nu - W$$

где W – работа выхода электронов.

Он объяснил, что фотон является частицей. Она падает на поверхность, ударяет по электрону и выбивает его. Здесь записан закон сохранения энергии.

Закон фотоэффекта:

- число высвобождаемых электронов пропорционально интенсивности падающего света,
- максимальная кинетическая энергия электронов E зависит от частоты ν падающего света и не зависит от интенсивности падающего света. В классической физике должно

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

было быть наоборот: облучаю мощным потоком, а электроны не летят до тех пор, пока их энергия не будет больше W.

- энергия электронов E является линейной функцией частоты падающего света ν,
- существует граничная частота света ν_0, ниже которой фотоэффект невозможен.

Мы имеем электрон и фотон. Может ли свободный электрон поглотить фотон? Не может, потому что если вы запишете закон сохранения энергии и импульса в такой системе координат, где электрон покоится после поглощения фотона,

$$\vec{p} = -\vec{k}$$

где $\vec{p}$ – импульс электрона, а $\vec{k}$ –импульс фотона.

Закон сохранения энергии:

$$\sqrt{c^2p^2 + m^2c^4} + |k|c = mc^2$$

то такое равенство выполняется только когда импульс фотона и электрона равен нулю, то есть при отсутствии фотона. Таким образом, поглощение свободным электроном фотона невозможно. Электрон каким-то образом должен быть связан, чтобы выполнялся закон сохранения энергии и импульса. Обычно электрон связан с атомом, поэтому происходит поглощение фотона.

Эффект Комптона (1922 год)

Имеется (Рисунок 19) покоящийся электрон, на него налетает фотон, разлетелись фотон и гамма-квант.

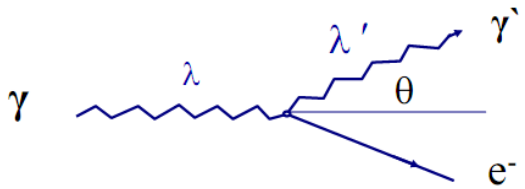


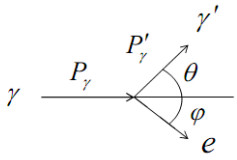
Рисунок 19. Эффект Комптона

Фотон имел определенную длину волны λ, так как он рассеялся и отдал часть энергии электрону, длина волны фотона уменьшается λ'.

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda' = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$$

Здесь стоят две мировые константы – постоянная Планка и с и стоит масса частицы, которая рассеивается. Рассеяние может быть на протоне, электроне и т.д. Если мы возьмем простейшую картинку, где фотон – шарик, электрон – шарик, эти шарики между собой сталкиваются, мы имеем упругое рассеяние фотона на электроне:

Упругое рассеяние фотона на электроне



Законы сохранения энергии и импульса

$$E_\gamma + E_0 = E'_\gamma + E_e,$$

$$\vec{P}_\gamma = \vec{P}'_\gamma + \vec{P}_e$$

$E_\gamma = \frac{hc}{\lambda}$ — энергия налетающего фотона,

$E_0 = mc^2 = 0{,}511$ МэВ — энергия покоя электрона,

$E_\gamma' = \frac{hc}{\lambda'}$ — энергия рассеянного фотона,

E_e — энергия электрона отдачи,

$P_\gamma = \frac{h}{\lambda}$ — величина импульса налетающего фотона,

$P_\gamma' = \frac{h}{\lambda'}$ — величина импульса рассеянного фотона,

P_e — величина импульса электрона отдачи,

θ — угол рассеяния фотона,

φ — угол рассеяния электрона отдачи $\left(\operatorname{tg}\varphi = \frac{\operatorname{ctg}\frac{\theta}{2}}{1+\frac{E_\gamma}{mc^2}} \right)$,

$\lambda_0 = \frac{h}{mc} = 2{,}4 \cdot 10^{-10}$ см $= 0{,}024$ Å

Вернемся к формуле, которая описывает изменение длины волны фотона, где θ — это угол, под которым полетел фотон,

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda' = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$$

Мы видим (Рисунок 20) изменение длины волны, если фотон летит под разными углами и первичную линию λ.

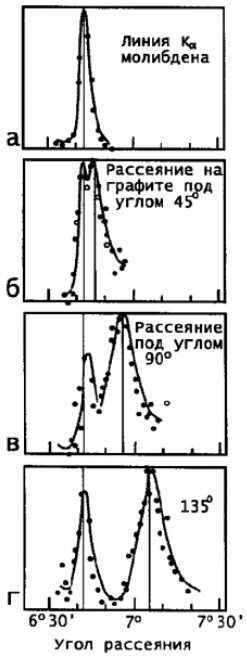


Рисунок 3.

Рассеяние электронов

Когда у вас есть металл, а опыты проводятся на металлах, у вас имеются свободные электроны, которые оторвались от атома. Тогда формула работает. Но в металле есть еще электроны, которые связаны с атомом, тогда эффективная масса их оказывается равной не массе электрона, а массе всего атома. Когда фотон падает на связанный электрон, получается первичная линия. Таким образом, видим 2 линии: одна характеризует рассеяние на связанных частицах, вторая – рассеяние на свободном электроне.

Обратный эффект Комптона

Если есть электрон и фотон, который на него налетает, то берем фотон (точнее, мощный пучок фотонов, лазерное излучение) и навстречу ему бросаем ускоренный пучок электронов. Электрон будет отдавать энергию фотону, и фотон будет рассеиваться назад, под гораздо большей энергией, чем он падал на электрон. Это важно, потому что есть ускорители, на которых можно ускорить протоны, получать ускоренные пучки нейтронов, получать π-мезоны. Ускорить фотоны невозможно, но если сделать обратный эффект Комптона, то можно получить пучок ускоренных фотонов.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Берем рубиновый лазер с энергией $E_{\gamma 0} = 1{,}78$ эВ, бросаем на него пучок электронов с энергией $E_0 = 10$ МэВ, то энергия фотов будет 2,7 кэВ, в тысячу раз энергия увеличилась. Увеличивая энергию электронов, увеличиваем энергию фотонов:

E_0	10 МэВ	100 МэВ	1 ГэВ	10 ГэВ
E_γ	2,7 кэВ	273 кэВ	28 МэВ	2,73 ГэВ

Интерференция электронов на двух щелях.

Возьмем источник электронов (Рисунок 21). Делаем 2 щели, берем экран. Перекрываем щель 2, пучок идет через щель 1 и получаем красное распределение. Закрываем щель 1, открываем щель 2, получаем синее распределение. Открываем обе щели. Получаем интерференционную картинку. Абсолютно такую же, как если бы у меня был пучок фотонов, который характеризуется определенной длиной волны.

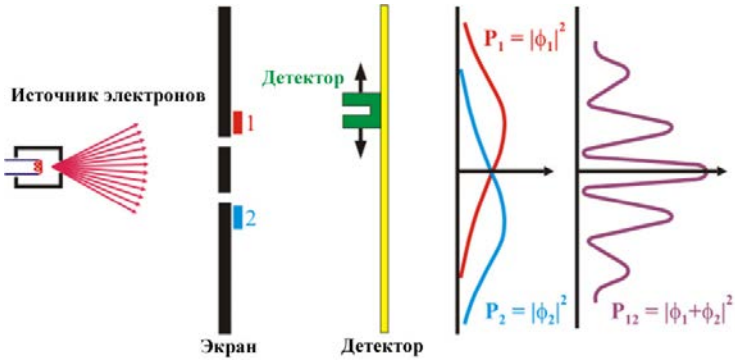


Рисунок 21. Схема эксперимента

Если длина волны электрона равна длине волны фотона, то картинки получаются абсолютно идентичные.

Мы установили, что фотоны ведут себя двояким образом: как частица и как волна. Оказалось, что электроны ведут себя точно так же: они имеют и корпускулярные, и волновые свойства. Это было впервые обнаружено де Бройлем. Волна характеризуется двумя параметрами – частотой и длиной волны. Частица тоже характеризуется двумя параметрами: энергией и импульсом. Частота связана с энергией, длина волны связана с импульсом:

$$\nu = \frac{E}{h} \qquad\qquad \lambda = \frac{h}{p}$$

Это соотношения де Бройля.

Почему электрон не является волной? Если я смотрю на экран (см. эксперимент с двумя щелями) и пускаю электрон, то на экране я вижу точку в определенном месте, а не волну. С другой стороны, как не волна может пройти через 2 щели? Это проявление двояких корпускулярно-волновых свойств частиц является фундаментальным свойством микромира. И они проявляют себя по-разному в разных случаях.

Рассмотрим картинку (Рисунок 22).

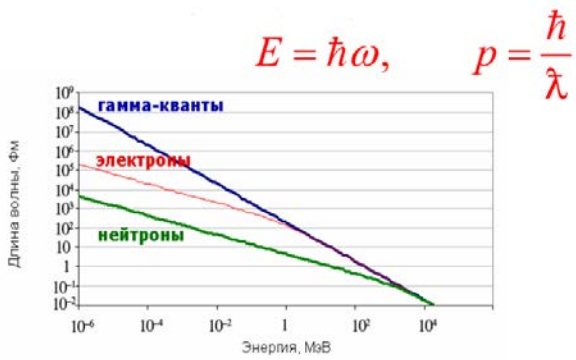


Рисунок 22. Соответствие энергии и длины волны для разных частиц

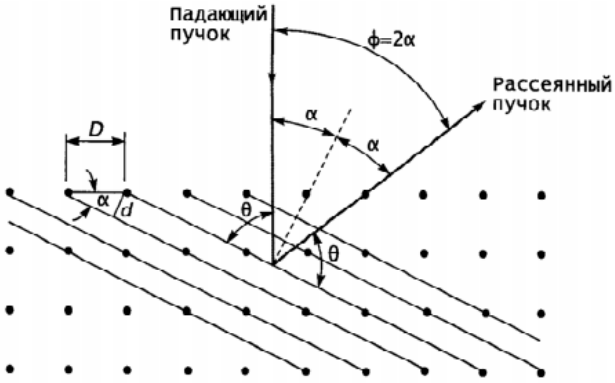
Определенной энергии соответствует своя длина волны для конкретной частицы. Рассмотрим пример: имеется фотон с приведенной длиной волны $\lambda\!\!\!^{-} = 3 \cdot 10^{-11}$ см. Вычислить импульс p фотона.

$$\mathrm{p} = \frac{\hbar}{\lambda\!\!\!^{-}} = \frac{\hbar c}{\lambda\!\!\!^{-} c} \approx \frac{200\ \text{МэВ} \cdot \text{Фм}}{300\text{Фм} \cdot \mathrm{c}} = 0{,}66\ \text{МэВ/с}$$

с- скорость света. В физике ядра импульс часто измеряется в МэВ/с(скорость света).

Проверка гипотезы де Бройля.

Возьмем кристалл, у него есть определенные оси, он будет давать нам дифракционную картинку рассеяние на одной оси, на другой, и вы увидите, что электроны будут рассеиваться так же, как фотоны, на этих осях. В 1927 году Дэвиссон и Джермер провели опыт (Рисунок 23) и увидели, что мы имеем дифракционную картинку.



Рассеяние электронов на кристалле. Электронные волны испытывают сильное рассеяние, при выполнении условия Брэгга $n\lambda = 2d\sin\theta$. Данное условие эквивалентно условию $n\lambda = D\sin\phi$.

Рисунок 23. Рассеяние электронов на кристалле

Томсон брал пучок рентгеновского излучения, бросал на монокристалл алюминия. На рисунке 24 мы видим изображения, какие получаются, когда вы кидаете пучок гамма-квантов. И пучок электронов такой же длины волны. Таким образом, частицы обладают свойствами корпускулярными и волновыми, и мы эти проявления видим.

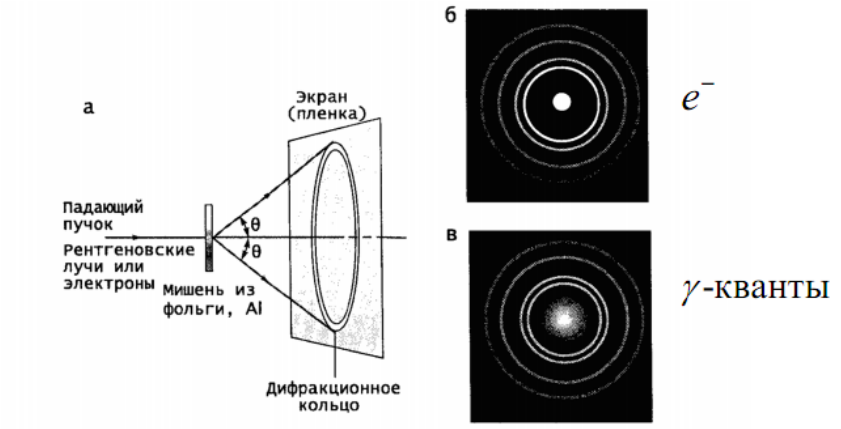


Рисунок 24. Рассеяние пучка гамма-квантов и электронов на монокристалле

Рассеяние на атомном ядре.

Имеем атомное ядро, на него падает электрон, это волна, падает на экран. На экране должна быть дифракция.

Зная энергию электрона и по положению максимумов и минимумов можно определить размер атомного ядра. Аналогичная ситуация при рассеянии нейтронов (Рисунок 25) с энергией E< 1 эВ на атомных ядрах. Сечение рассеяния будет определять такой формулой:

$$\sigma = \pi(R + \lambda)^2,$$

где λ - длина волны нейтрона.

Когда летит нейтрон с маленькой энергией, он видит перед собой ядро размером порядка нескольких фм ($\pi R^2 \sim 10^{-24}$ см^2), он видит вместо этого площадку в тысячу раз больше. Потому что он краем своей волны чувствует это ядро.

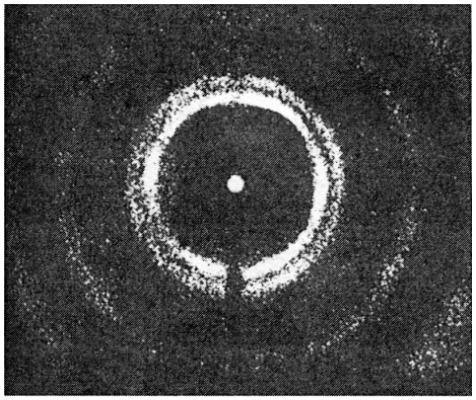


Рисунок 25. Дифракционная картина при рассеянии нейтронов на атомных ядрах

Задача: Какой должна быть кинетическая энергия электронов, чтобы с их помощью исследовать внутреннюю структура атома, атомного ядра и нуклона?

Вы должны длину волны электрона согласовать с размером того объекта, который вы хотите. Если изучаете атом, то длина волны 10^{-8} см, ангстрем. Если изучаете ядро, то должно быть несколько фм, если изучаете нуклон, то должно быть 0,8

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

фм. Подставляем в формулы соответствующие длины и получаете энергию, которая вам необходима.

В случае атома: $\lambda_e \leq R_{ат}$. Электрон нерелятивистский, поэтому

$$\lambda_e = \frac{h}{p_e} = \frac{2\pi\hbar c}{\sqrt{2m_e c^2 \cdot T_e}} \leq R_{ат}$$

Откуда получаем:

$$T_e \geq \frac{1}{2m_e c^2}\left(\frac{2\pi\hbar c}{R_{ат}}\right)^2 \approx \frac{1}{10^6 эВ}\left(\frac{1240 \cdot 10^6 эВ \cdot 10^{-13} см}{10^{-8}\,см}\right) \approx 160\ эВ$$

В случае ядра электрон должен быть релятивистским,

$$\lambda_e = \frac{2\pi\hbar c}{p_e c} \approx \frac{2\pi\hbar c}{T_e} \approx \frac{1240\ Мэв \cdot Фм}{T_e(Мэв)} \leq R_{яд}.$$

Для ядра с $A \approx 60$, имеющего $R_{яд} \approx 4$ Фм, $T_e \geq 300$ МэВ

В случае нуклона $R_N \approx 1$ Фм электрон также должен быть релятивистским, поэтому

$$T_e \geq \frac{2\pi\hbar c}{R_N} \approx \frac{1240\ Мэв \cdot Фм}{1Фм} = 1{,}24\ ГэВ$$

Теперь получим формулу, которая работает как в релятивистском, так и нерелятивистском случае.

Релятивистское соотношение для энергии:

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$$

$mc^2 = E_0^2$ – энергия покоя.

$$E = E_0 + E_k$$
$$(E_0 + E_k)^2 = (pc)^2 + E_0^2$$

Получаем для импульса:

$$p = \frac{(2E_0E_k + E_k^2)^{1/2}}{c}$$

Переходим к длине волны:

$$\lambda = \frac{hc}{(2E_0E_k + E_k^2)^{1/2}}$$

$$\lambda = \frac{{hc}/{mc^2}}{\frac{(2E_0E_k + E_k^2)^{1/2}}{E_0}} = \frac{{h}/{mc}}{(2\left({E_k}/{E_0}\right) + \left({E_k}/{E_0}\right)^2)^{1/2}}$$

Дальше получаю λ, выраженную через коптоновскую длину волны:

$$\frac{\lambda}{\lambda_c} = \frac{1}{[2\left({E_k}/{E_0}\right) + ({E_k}/{E_0})^2]^{1/2}}$$

m – масса нейтрона, протона и т.д.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

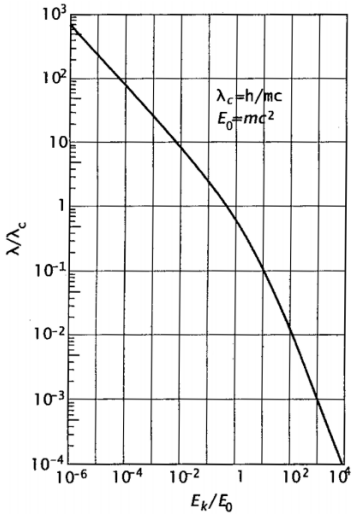


Рисунок 26. Зависимость λ⁄λк от Ek⁄E0

Вот то, что мы только что рассчитали (Рисунок 26). Зависимость отношения длины волны де Бройля λ к комптоновской длине волны λ_c от отношения кинетической энергии E_k к энергии покоя $E_0 = mc^2$ для частицы с массой m.

Соотношение неопределенности.

Если мы знаем импульс и координату классической частицы, в квантовой физике нельзя одновременно измерить координату и импульс. Если мы хотим очень точно измерить координату, то уменьшаем размер щели, через которую пропускаем частицу, при этом дифракционная картинка расползается. Импульс будет меняться. Между импульсом и координатой существует соотношение, которое впервые Гейзенберг, соотношения между канонически сопряженными динамическими переменными (импульс-координата, энергия – время, угол – момент количества движения), характеризующими квантовую систему:

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \hbar$$
$$\Delta E \cdot \Delta T \geq \hbar$$
$$\Delta \varphi \cdot \Delta J_z \geq \hbar$$

Это соотношения неопределенности.

Спин

Каждая частица имеет определенное значение спина. Если есть частица, я могу вращать ее, тогда она будет иметь орбитальный момент относительно моего центра. Она может вращаться вокруг собственной оси. Это вращение есть аналог спина. Но на самом деле это не вращение частицы. Если вы возьмете электрон и завращаете его так, чтобы он дал нужное значение спина, то выяснится, что поверхность электрона вращается со скоростью, сильно превышающей скорость света. Такого быть не может. На самом деле спин – независимая величина, которая имеет такой аналог в классической физике. Но это квантовое число.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Лекция 3. Квантовые свойства системы частиц

Как устроен мир

Известно, что мир устроен, как матрешка. Опускаемся на низший уровень, фундаментальный уровень материи (Рисунок 27).

ФЕРМИОНЫ

Спин $J = 1/2$

Лептоны (спин = 1/2)				Кварки (спин = 1/2)			
Аромат		Масса, ГэВ/c^2		Аромат		Масса, ГэВ/c^2	Электрический заряд
ν_e	электронное нейтрино	$<1\cdot10^{-8}$	**1 поколение**	u	up	0,003	2/3
e	электрон	0,0005111		d	down	0,006	–1/3
ν_μ	мюонное нейтрино	$<0,0002$	**2 поколение**	c	charm	1,3	2/3
μ	мюон	0,106		s	strange	0,1	–1/3
ν_τ	тау-нейтрино	$<0,02$	**3 поколение**	t	top	175	2/3
τ	тау	1,7771		b	bottom	4,3	–1/3

Рисунок 27. Фермионы

Это лептоны (электрон, электронное нейтрино, мюонное нейтрино, мюон, тау-нейтрино, тау), они имеют спин = $^1/_2$. В переводе с греческого «лептон» — это легкая частица. Мы привыкли, что есть фундаментальный заряд электрический, заряд электрона -1, заряд протона 1, они равны по абсолютной величине (с точностью до 9-10 знака). Но электрические заряды кварков – дробные. Имеется всего 2 стабильных частицы – электрон и протон. В антимире – позитрон и антипротон.

Существует 3 типа нейтрино: электронное, мюонное и тау. До недавнего времени считалось, что масса нейтрино равна нулю. Но сегодня известно, что они обладают малой массой, но какая она – мы не знаем. Поэтому не знаем, распадаются они или нет. Мы видим 3 разделение на три группы: 1-е поколение, 2-е поколение, 3-1 поколение. Это связано с тем, какие энергии мы имеем в этом мире. При тех энергиях, в которых мы существует на Земле (от -50 до +50 градусов), существуют протоны, электроны, нейтроны, атомы, молекулы, они не разваливаются. Если идем к более высоким энергиям, то вступают частицы второго поколения, а при еще больших энергиях вступают частицы 3-го поколения. Для того, чтобы мы могли их возбудить, нужно затратить большую энергию. они имеют очень короткое время жизни и начинают распадаться.

Взаимодействия

Имеется позитрон и электрон (Рисунок 28), позитрон выбросил гамма-квант, эта частица захватила гамма-квант, и они начали разлетаться (сходиться либо расходиться, в зависимости от того, какие это частицы: если два электрона, то они расходятся, если электрон и позитрон, то притягиваться). Это электромагнитное взаимодействие.

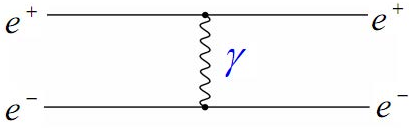


Рисунок 28. Взаимодействие электрона и позитрона

Сильное взаимодействие (Рисунок 29) – это взаимодействие, которое связывает кварки. Кварки связываются глюоном, происходит обмен глюонами.

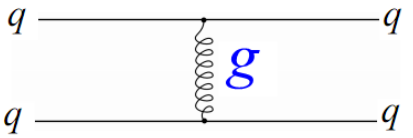


Рисунок 29. Сильное взаимодействие

Слабое взаимодействие (Рисунок 30) – массы частиц, которые обмениваются слабыми взаимодействиями – это 80 и 90 ГэВ. Это очень массивные частицы, поэтому взаимодействие слабое. Если радиус электромагнитного взаимодействия бесконечный, радиус гравитационного взаимодействия бесконечный, то у слабого взаимодействия 10^{-18} см. Оно происходит с помощью трех частиц: W^+, W^- и Z – бозон.

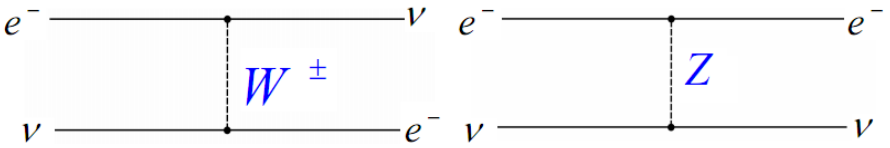


Рисунок 30. Слабое взаимодействие

Эти частицы называются переносчиками взаимодействия от одной частицы к другой. На этой картинке электрон испустил переносчик взаимодействия и превратился в нейтрино. Изменился тип частицы. Но может и не меняться: если электрон испустил Z-бозон, то так и остался электроном.

Взаимодействия **Спин J=1**

Взаимодействие	На какие частицы действует	Калибровочные бозоны	Радиус действия	Константа взаимодействия
Сильное	Все цветные частицы	8 глюонов, безмассовые.	$1\ \text{Фм} = 1/m_\pi$	1
Электромагнитное	Все электрически заряженные частицы	Фотон, безмассовый.	∞	1/137
Слабое	Кварки, лептоны, электрослабые калибровочные бозоны	W^+, W^-, Z, $m(W^\pm) = 80$ Гэв, $m(Z) = 91$ Гэв.	$10^{-2}\ \text{Фм} = 1/m_W$	~1/30
Гравитационное	Все массивные частицы	Гравитон, спин $J = 2$, безмассовый	∞	10^{-38}

Рисунок 31. Взаимодействия

Этих частиц 8 (Рисунок 31), причем они имеют своей квантовой характеристикой цвет, это цветные частицы. Сильное взаимодействие – это взаимодействие цветных частиц.

Рентгеновские лучи

Свойства рентгеновских лучей отличаются от свойств видимого света. Получить его просто: берем трубку, положительный и отрицательный электрод, из катода вылетают электроны, если его нагреть, если подать высокую разность потенциалов, электрон будет ускоряться, бить по аноду и вызывать свечение. Пока длина волны большая (энергия электрона, который бьет в анод, маленькая), он тормозится, и мы имеем спектр (Рисунок 32).

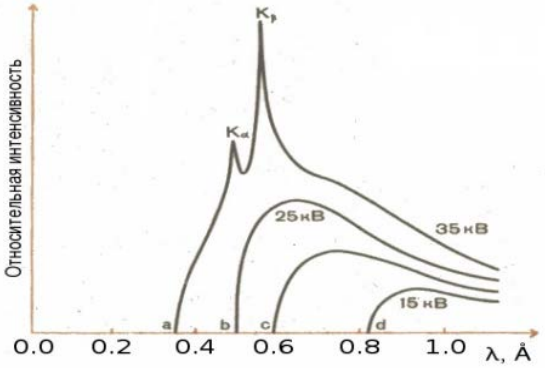


Рисунок 32. Спектр рентгеновского излучения

Гладкий спектр рентгеновского излучения. Увеличиваем энергию – верхняя граница сдвигается, потому что максимальная энергия, которая будет возникать, определяется разностью потенциалов между анодом и катодом: чем больше V, тем частота, тем меньше длина волны: $h\nu_{max} = eV$.

Природа рентгеновского спектра

Есть атомное ядро, вокруг него находятся электроны на определенных уровнях. Чем ближе к ядру находится электрон, тем выше его энергия связи, чем дальше – тем меньше. И, наконец, когда мы уходим достаточно далеко, мы электрон можем оторвать.

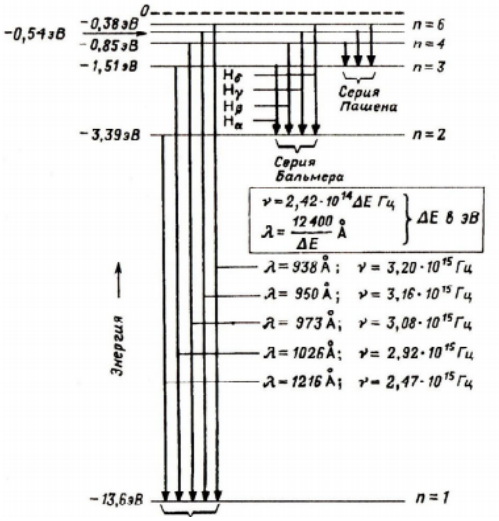


Рисунок 33. Переходы в ядре

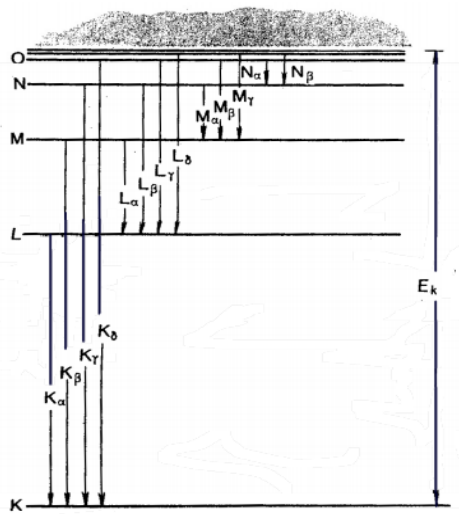


Рисунок 34. Электронные оболочки атома

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Если есть ядро и дискретные уровни, то между ними могут происходить переходы. Если возбудить атом, то судьба этого атома такая: он может испустить излучение и перейти в другое состояние. В конечном итоге система всегда переходит в состояние с минимальной энергией. Если атом находится в возбужденном состоянии, то он разными способами будет пытаться из них перейти. Первая оболочка в атоме, которая ближе всего находится, называется K-оболочка, потом L, M, N и так далее. Эти переходы оказываются дискретными, потому что уровни дискретные. Если я вычитаю энергию одного уровня энергию другого, то получаю энергию перехода. Если переход происходит, то туда, то сюда, то я получаю 2 перехода, две энергии. Это природа рентгеновского спектра. Он появляется тогда, когда мы атом возбуждаем.

Модель Бора. Атом водорода.

Впервые это объяснил Бор. Он взял атом водорода. Электрон может находиться на вполне определенном уровне, оболочке (K, L, M И так далее) либо совершает определенные переходы с уровня на уровень. Это переходы внутри атома.

Основные положения модели:

1. Электрон равномерно вращается вокруг атомного ядра по круговой орбите под действием кулоновских сил в соответствии с законами Ньютона.
2. Разрешенными орбитами электрона являются только те, для которых момент импульса равен $n\hbar$, n-целое число.
3. При движении электрона по стационарной орбите атом не излучает энергию.
4. При переходе с орбиты с энергией E_i на другую орбиту с энергией E_f ($E_i \geq E_f$) излучается фотон, имеющий энергию $h\nu = E_i - E_f$.

Движение электрона по круговой орбите, сила, которая действует на него определяется кулоновской энергией взаимодействия:

$$F = \frac{Ze^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

Частота обращения f:

$$f = \frac{v}{2\pi r} = \left(\frac{Ze^2}{4\pi^2 m}\right)^{1/2} \cdot \frac{1}{r^{3/2}}$$

Условие стационарной орбиты. Квантование углового момента.

$$L = mvr_n = n\hbar,$$

$$r_n = \frac{n\hbar}{mv} = \frac{n^2\hbar^2}{mZe^2}$$

Боровский радиус n=1, Z=1 $\quad r_n = \frac{\hbar^2}{me^2} = 0{,}529$ Å – это характерная величина.

Полная энергия электрона E тоже квантуется, зависит от квадрата заряда ядра (в случае водорода – это заряд протона)

$$E = E_{кин} + E_{пот} = \frac{Ze^2}{2r_n} - \frac{Ze^2}{r_n} = -\frac{Ze^2}{2r_n} = -\frac{mZ^2e^4}{2\hbar^2 n^2}$$

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Энергия электрона на 1-ой боровской орбите (чтобы вырвать один электрон, я должен потратить столько энергии). Основное состояние:

$$E_0 = -\frac{me^4}{2\hbar^2} = -13{,}6 \text{ эВ}$$

Энергия переходов $n_f \to n_i$ $\hbar\omega = -\frac{mZ^2e^4}{2\hbar^2}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$

Постоянная Ридберга $R = \frac{E_0}{hc} = 1{,}097 \cdot 10^9$ см

Опыт Франка-Герца

Подтверждением всему этому является опыт Франка-Герца (Рисунок 35).

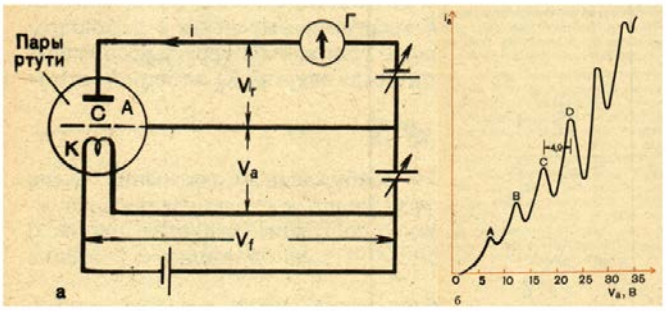


Рисунок 35. Опыт Франка-Герца

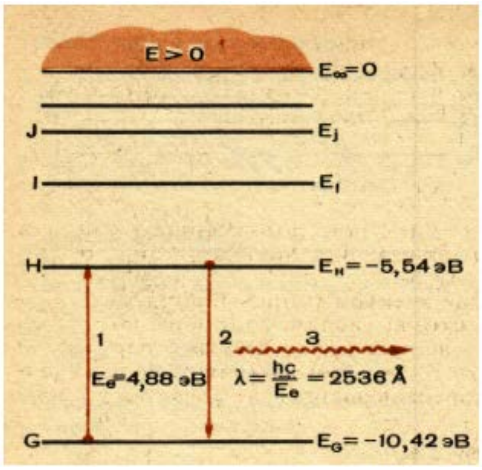


Рисунок 36. Энергетические уровни в парах ртути

Есть катод, анод, подал разность потенциалов, поставил сетку, чтобы удерживать электроны с малой энергией от попадания на анод, начал повышать напряжение на аноде. Вылетел электрон, если он сталкивается с атомом и атом не переходит в первое возбужденное состояние, то чем большее напряжение подаем, тем большее число электронов доходит до анода. Как только электрон переходит через первое возбужденное состояние, атом забирает часть энергии, электрон по дороге теряется, что-то с ним происходит, и не доходит, на картинке видим спад. Потом следующий спад. Если посмотреть на расположение энергетических уровней в парах ртути (Рисунок 36), то чтобы оторвать электрон из основного состояния нужно 10, 42 эВ, энергия первого возбужденного состояния. До тех пор, пока энергия электрона не будет такой, он не будет передавать энергию атому, будет только упругое рассеяние: электрон налетает и взаимодействует со всем атомом, он энергию не теряет. Но как только атом может захватить энергию, электрон энергию отдал и не дошел до анода. Это и есть опыт Франка-Герца. Эти максимумы мы видим

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

через каждые 5,54 эВ, которые получаются из $E = E_h - E_0 = -5{,}54$ эВ $- (-10{,}42)$эВ $= 4{,}88$ эВ.

Потенциал ионизации атома

Берем разные атомы. Они отличаются зарядом атомного ядра. Чем больше заряд ядра, тем больше сила притяжения электронов к этому ядру, поэтому труднее оторвать электрон. Посмотрим на картинку (Рисунок 37).

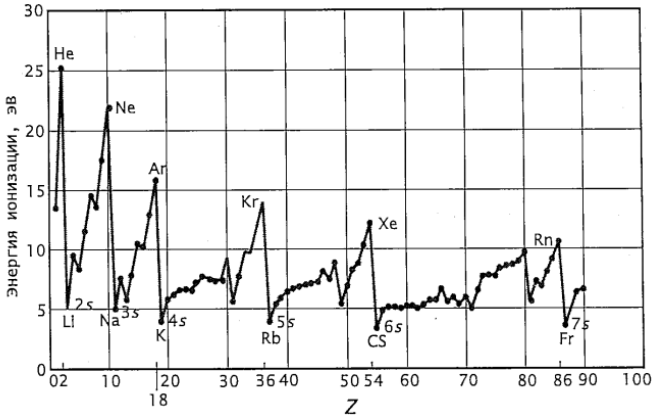


Рисунок 37. Зависимость энергии ионизации от Z

Электроны находятся на определенных орбитах, если орбита дальше от ядра, то взаимодействие будет слабее. Поэтому он переходит на следующую орбиту, Z увеличивается, энергия отделения увеличивается, если доходим до неона, то энергия отделения максимальна, оболочка, в которую садились электроны между литием и неоном заполнились, туда больше нельзя поместить электроны в соответствии с принципом Паули. Следующее заполнение оболочки – он помещается еще дальше. Максимумы соответствуют электронным оболочкам.

Атомное ядро вокруг себя захватывает электроны так, чтобы полностью они нейтрализовали заряд ядра, то есть число электронов вокруг ядра равно заряду ядра, но электроны вокруг ядра не расположены хаотично, они находятся на орбитах. Это Бор предугадал, что могут существовать определенные состояния, в которых могут находиться электроны, и когда они в них находятся, то никто ничего не излучает.

Следующий важный шаг был сделан Мозли. Он брал различные атомы и измерял у них энергию переходов с К-оболочки. Он показал, что та модель, что была предложена Бором, верна. И из его опыта следует, что число электронов равно заряду атомного ядра (ядра захватили электроны, электроны сели, создали нейтральный атом). Сила гравитационного взаимодействия пропорциональна r^2, сила электромагнитного взаимодействия тоже пропорциональна r^2.

Ядерные силы спрятаны на расстоянии 10^{-13} см, они действуют на очень малом расстоянии (размер протона 0,8 фм, а радиус действия ядерных сил 1,5 фм максимум). У вас имеет экранировка заряда и сильного взаимодействия. А гравитационное

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

взаимодействие между материей и антиматерией не имеет разности знаков, чем больше материи, тем больше гравитационное взаимодействие.

Следующий шаг был сделан Эйнштейном, который сказал, что гравитирующее тело искривляет пространство. Если взять плоское пространство и положить в него Солнце, то оно искривит пространство, и Земля, вращаясь, будет чувствовать это искривленное пространство, как вода, которая крутится вокруг воронки и стекает. Потому что она имеет орбитальный момент. То же самое и планеты имеют орбитальный момент, поэтому они падают на Солнце (по мере того, как момент будет уменьшаться). Из графика Мозли мы можем определить заряд атомного ядра.

Статистическая природа квантовых явлений.

Есть пучок электронов, с колоссальной точностью вы знаете его энергию, длину волны, а в какую точку экрана он попадет, вы не знаете. Куда он попадет, будет определяться волновыми свойствами. Но то, что он попал в какую-то точку, и там возникло свечение, определяется корпускулярными свойствами.

Как работает $\Delta E \cdot \Delta T \geq \hbar$? Если вы имеете какое-то возбужденное состояние, допустим, ядро находится в первом возбужденном состоянии, знаете период полураспада, например 2 с, то это означает, что каждые 2 с число радиоактивных ядер, которые находятся в этом состоянии, будет уменьшаться в 2 раза. Но если я возьму конкретное ядро и буду смотреть на него, то когда оно прейдет из возбужденного состояния в основное, я не знаю. Квантовая теория – это статистическая теория. Мы с колоссальной точностью можем измерить период полураспада, если размер дырочки такой-то, а энергия частиц такая-то, то с какой вероятностью электрон будет попадать туда. Чем больше опытов мы проведем, тем с большей вероятностью мы сможем определить эти величины. Квантовая теория говорит о средних величинах.

Когда есть большое число частиц, то вводим понятие температуры и давления. Вводим усредненные характеристики. Об отдельной частице мы можем говорить только об энергии и импульсе. А о совокупности частиц мы говорим, что есть температура, и в зависимости от нее будет распределение частиц по энергиям, скоростям, распределение Максвелла. Больцман говорил о распределении частиц по энергиям, а Максвелл – о распределении частиц по скоростям.

Если я не могу говорить о поведении одной частицы, то как описывать явления? Введу новую величину – волновая функция, а точнее квадрат волновой функции. Так как для квантовой частицы нельзя одновременно определить значения координаты и импульса, то не имеет смысла говорить о движении частицы по определенной траектории в пространстве, можно определить только вероятность нахождения частицы в данной точке в данный момент времени, которая определяется квадратом модуля волновой функции:

$$W \sim |\psi(x, y, z, t)|^2 dV$$

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Чем больше вероятность этой волновой функции, тем больше вероятность нахождения там частицы. Если мы проводим интерференционный опыт, то чем больше потемнение пластины, тем больше вероятность нахождения там частицы.

Волновая функция должна быть совместима с соотношениями

$$\lambda\!\!\!^{-} = \frac{\hbar}{p} \qquad E = \hbar\omega$$

$$E = \frac{p^2}{2m} + U$$

E - гамильтониан системы – это энергия частицы, которая складывается из кинетической и потенциальной энергии.

Волновая функция должна быть ограничена. Потому что если есть частица, то она где-то в пространстве находится. Если уходим на бесконечность, то значение волновой функции должно быть равно нулю, иначе не имеет смысла.

$\psi(x,t)$ должна быть линейной относительно всевозможных решений уравнений Шредингера. Если $\psi_1(x,t)$, $\psi_2(x,t)$, …, $\psi_n(x,t)$ являются решениями уравнения Шредингера, то функция

$$\psi(x,t) = a_1\psi_1 + a_2\psi_2 + \cdots + a_n\psi_n = \sum_{i=1}^{n} a_i\psi_i,$$

где $a_1, a_2, \ldots, a_n$ - некоторые постоянные, также представляют возможную волновую функцию.

Производная от волновой функции должна быть линейной. Волновая функция и ее производная должна быть однозначной, конечной и непрерывной.

Операторы

Для того чтобы определять характеристики частиц вводятся операторы. Каждой физической величине F в квантовой теории сопоставлянтся линейный оператор $\hat{F}$, который действует на волновую функцию $\psi(r,t)$. Оператор – это команда, он говорит: умножай волновую функцию на x, а тут дифференцируй волновую функцию, дважды дифференцируй. Сделай такую команду, и получишь другую волновую функцию тех же переменных.

$$U(r,t) = \hat{F}\psi(r,t)$$

Если есть величина F, среднее значение ее, оно будет определяться оператором этой величины, который находится в обкладках волновой функции (это ψ и ψ^*)

$$\bar{F} = \int \psi^*\hat{F}\psi dV$$

Это правило, по которому вычисляют величины в квантовой теории.

Важный момент: имеем квантовый мир, мы проводим эксперименты с величинами, которые описываются понятиями макрофизики: энергии, импульс, свечение, переход из одного состояния в другое и т.д. Поэтому квантовая теория в предельном случае должна иметь соответствующие величины, которые соответствуют этим величинам, с которыми мы работаем в классичеком мире. Это координата – оператор координаты, импульс – оператор импульса, энергия – оператор энергии, при

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

определенных условиях мы должны получить ту же самую величину, которую получаем в классической физике, должно быть соответствие.

Основной постулат квантовой механики: среднее значение $\bar{f}$ определяется оператором $\hat{F}$, который мы берем в обкладки волновой функции ψ и комплексно-сопряженной функцией ψ^*:

$$\bar{f} = \int \psi^* \hat{f}\psi dx$$

Все свойства физической системы полностью определяются заданием ее волновой функции. Экспериентально измеренные средние значения любой физической величины f , характеризующей систему, может быть вычислено по известной волновой функции ψ.

Волновая функция нам нужна, чтобы определять спектр. Спектральные линии получаются, если взять волновую функцию и оператор энергии, взять состояние волновой функции, получим собственные зачения, т.е энергии, которые соответствуют данной волновой функции. Решаем уравнение:

$$\hat{F}\psi_n(x) = F_n\psi_n(x)$$

Оператор подействовал на волновую функцию, получается волновая функция, умноженная на число. Это число и характеризует среднее значение, которое в этом состоянии будет получаться. Это волновые функции и собственные значения. Совокупность величин F_n определяет спектр возможных значений физической величины F.

Оператор координаты

Если волновая функция действует на оператор координаты
По определению среднее значение координаты x

$$\bar{x} = \int x|\psi(x)|^2 dx = \int \psi^*(x) \cdot x \cdot \psi(x) dx \ (*)$$

По определению

$$\bar{x} = \int \psi^*(x)\hat{x}\psi(x)dx \quad (**)$$

Сравнивая соотношения (*) и (**), получаем

$$\hat{x} = x$$

Если вы видите оператор координаты, то берете координату и умножаете на волновую функцию и получаете среднее значение.

Оператор импульса

Записываем соотношение, ставим в него оператор импульса

$$\overline{p_x} = \int \psi^* \cdot \widehat{p_x} \cdot \psi dx \ (*)$$

Если частица движется в пространстве свободно, ничто ее не ограничивает, то она описывается волновой функцией?

$$\Psi = A\exp\left(-\frac{i}{\hbar}(p_x \cdot x - Et)\right) \qquad (*)$$

Частица будет иметь определенное значение импульса:

$$\overline{p_x} = p_x = \int A e^{\frac{i}{\hbar}(p_x x - Et)} \widehat{p_x} A e^{-\frac{i}{\hbar}(p_x x - Et)}\, dx \quad (*)$$

В силу нормировки волновой функции

$$A^2 \int e^{\frac{i}{\hbar}(p_x x - Et)} \cdot e^{-\frac{i}{\hbar}(p_x x - Et)} dx = 1$$

Для выполнения соотношения (*) оператор импульса должен иметь вид:

$$\widehat{p_x} = -i\hbar \frac{d}{dx}$$

Это оператор дифференцирования. То есть я просто беру фолновую функцию, ее дифференцирую и умножаю на (-iħ).

Для кинетической энергии в классической физике имеем:

$$T = \frac{p^2}{2m} = \frac{1}{2m}(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)$$

В квантовой физике оператор кинетической энергии:

$$\widehat{p_x} = -i\hbar \frac{d}{dx}$$

$$\widehat{p_н} = -i\hbar \frac{d}{dy}$$

$$\widehat{p_z} = -i\hbar \frac{d}{dz}$$

$$\widehat{T} = -\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}\right)$$

Оператор орбитального момента количества движения

Оператор орбитального момента количества движения:

$$\widehat{l_x} = \hat{y}\widehat{p_z} - \hat{z}\widehat{p_y} = \left(\frac{\hbar}{i}\right)(y\,\partial/\,\partial z - z\partial/\,\partial y)$$

$$\widehat{l_y} = \hat{z}\hat{x} - \hat{x}\widehat{p_z} = \left(\frac{\hbar}{i}\right)(z\,\partial/\,\partial x - x\partial/\,\partial z)$$

$$\widehat{l_z} = \hat{x}\widehat{p_y} - \hat{y}\hat{x} = \left(\frac{\hbar}{i}\right)(x\,\partial/\,\partial y - y\partial/\,\partial x)$$

Мы использовали основной принцип квантовой физики: определение средних величин и соответствие между классической и квантовой физикой.

Принцип тождественности частиц

Частица обладает волновыми свойствами. Есть 2 шарика. На одном шарике рисуем цифру 1, на втором – 2. Сталкиваем, разлетаются. Видим цифры 1 и 2 и видим, как прошел процесс рассеяния.

Если я сталкиваю 2 электрона, различить из мы не можем. Электроны все тождественные. Когда они сошлись, из-за того, что они имеют волновые свойства, не видим, где первый, где второй, они перемешались. Когда они полетели, мы можем только сказать, что в начале было 2 электрона, и в конце тоже 2. А где какой нет.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Это приводит к принципу тождественности частиц. Потому что частицы обладают волновыми свойствами.

Статистика

Я могу ввести оператор перестановки двух частиц. Оператор подействовал на волновую функцию, которая состоит из A частиц, он частицы 1 и 2 поменял местами:

$$\widehat{\Pi_{12}}\psi(1,2,\dots,A) = \psi(2,1,\dots,A)$$

Нужно записать через операторы и собственные значения:

$$\widehat{\Pi_{12}}\psi(1,2,\dots,A) = \varepsilon\psi(1,2,\dots,A)$$

Дважды меняю, возвращаюсь в исходное состояние, поэтому ε^2

$$\widehat{\Pi}_{12}^2\psi(1,2,\dots,A) = \varepsilon^2\psi(1,2,\dots,A) = \psi(1,2,\dots,A)$$

Так как вернулись в исходное состояние, то $\varepsilon^2 = 1$.

Тогда $\varepsilon = \pm 1$. Если $\varepsilon = +1$, то имеем симметричное состояние:

$$\widehat{\Pi_{12}}\psi(1,2,\dots,A) = \psi(1,2,\dots,A)$$

Волновая функция частиц симметрична, а при $\varepsilon = -1$ при действии оператора появляется знак «−»:

$$\widehat{\Pi_{12}}\psi(1,2,\dots,A) = -\psi(1,2,\dots,A)$$

То есть волновая фенкция частиц антисимметрична относительно перестановки частиц:

$$\psi(2,1,\dots,A) = -\psi(1,2,\dots,A)$$

Если я переставляю 2 частицы, волновая функция может быть либо симметрично, либо антисимметрична. Волна описывается функцией sin, она симметрична относительно нуля, а если cos, то функция несимметрична.

Различие между классической физикой и квантовой статистикой заключается в том, что если есть 2 частицы 1,2, и два различных одночастичных состояния ψ_n и ψ_m, то в классической физике я могу обе частицы поместить в состояние ψ_n: $\psi_n(1)$ и $\psi_n(2)$. Могу поместить обе частицы поместить в состояние ψ_m: $\psi_m(1)$ и $\psi_m(2)$. Могу поместить одну в одно состояние, вторую в другое: $\psi_n(1)$ и $\psi_m(2)$. Могу их поменять местами: $\psi_m(1)$ и $\psi_n(2)$. Если есть 2 частицы и 2 состояния, то в классической физике есть 4 возможности. В квантовой физике, если частицы тождественны, то имеем симметричное и антисимметричное состояние.

Если волновая функция симметричная, то можно обе частицы поместить в состояние ψ_n: $\psi_n(1)$ и $\psi_n(2)$. Можно обе частицы поместить в состояние ψ_m: $\psi_m(1)$ и $\psi_m(2)$. И поместить дну частицу в состояние ψ_n, другую – в ψ_m и наоборот.

$$\psi_{sim} = \psi_n(1)\,\psi_m(2) + \psi_m(1)\,\psi_n(2)$$

Если волновая функция симметрична, то есть 3 состояния, вместо 4 в классической физике.

Если состояние антисимметричное, то только одно состояние возможно.

$$\psi_{asim} = \psi_n(1)\,\psi_m(2) - \psi_m(1)\,\psi_n(2)$$

Если стостояния ψ_nи ψ_mодинаковые, n=m, то ситуация интересная.

Разместим частицы по состояниям:

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

$$\psi_{nm}(1,2) = \psi_n(1)\,\psi_m(2)$$
$$\psi_{nm}(2,1) = \psi_n(2)\,\psi_m(1)$$

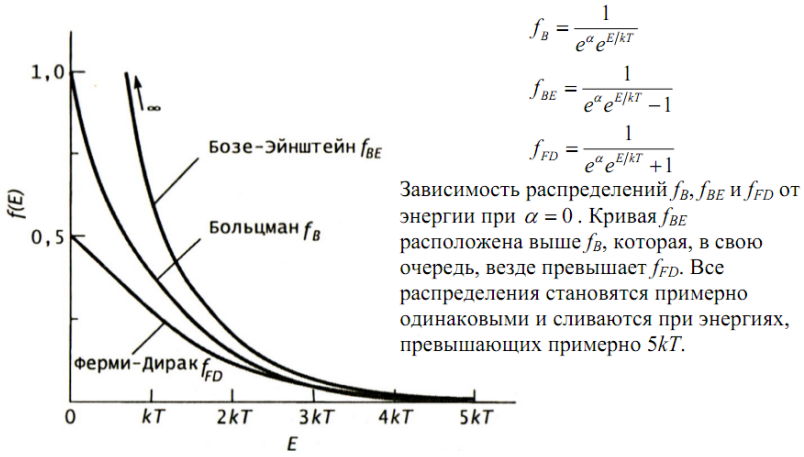
Есть 3 статистики (Рисунок 49): классическая статистика Больцмана.

$$\psi_{nm}(1,2) = \psi_{nn}(2,1) = \psi_n(1)\,\psi_n(2) = \psi_n(2)\,\psi_n(1) = \psi_B$$
$$\psi_B^*\psi_B = \psi_n^*(1)\psi_n^*(2)\psi_n(1)\psi_n(2)$$

Если состояние симметричное: $\psi_s = \frac{1}{\sqrt{2}}[\psi_n(1)\psi_m(2) + \psi_n(2)\,\psi_m(1)]$

Если антисимметричное: $\psi_a = \frac{1}{\sqrt{2}}[\psi_n(1)\psi_m(2) - \psi_n(2)\,\psi_m(1)]$

Появляются 2 статистики: Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака. Различие в единицу.



$$f_B = \frac{1}{e^{\alpha}e^{E/kT}}$$
$$f_{BE} = \frac{1}{e^{\alpha}e^{E/kT} - 1}$$
$$f_{FD} = \frac{1}{e^{\alpha}e^{E/kT} + 1}$$

Зависимость распределений f_B, f_{BE} и f_{FD} от энергии при $\alpha = 0$. Кривая f_{BE} расположена выше f_B, которая, в свою очередь, везде превышает f_{FD}. Все распределения становятся примерно одинаковыми и сливаются при энергиях, превышающих примерно $5kT$.

Рисунок 38. Зависимость распределений от энергии

Положим $e^{\alpha} = 1$ ($\alpha = 0$), в экспоненте E – энергия, $e^{\frac{E}{kT}}$. Она определяет, если имеется какая-то температура, классическую физику определяем температурой, сколько частиц будут иметь энергию E при данной температуре. Это классическая статистика Больцмана.

Посмотрим статистику Бозе-Эйнштейна. Отличается тем, что в знаменателе (-1). А в статистике Ферми-Дирака вместо (-1) стоит (+1). Какие частицы какой статистике подчиняются? Фермионы, частицы которые имеют спин ½, подчиняются статистике Ферми-Дирака. А бозоны обладают свойством, что если в низшем состоянии появился бозон, то он будет другие бозоны притягивать к себе – лазер, кванты лазерного излучения имеют спин 1 и поэтому они подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна. Поэтому имеем большой поток квази-монохроматических излучений. А фермионы – есть одно состояние, в него можно поместить только один фермион. Это приводит к тому, что электроны (фермионы) на низшем уровне может находиться 2 электрона, на следующем еще 6 электронов и так далее. Отсюда возникает это распределение, которое определяется тем, являются ли частицы фермионами или бозонами. Это определяет стоение атомного ядра, электронной оболочки, строение лазера.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Лекция 4. Уравнение Шредингера

Волновая функция и операторы

Для того, чтобы описать состояние частиц, вводим понятие волновой функции. Смысл имеет только ψ^2 - это квадрат модуля волновой функции, которая определяет вероятность пребывания частицы в точке с координатами (x,y,z) в объеме dV:

$$W \sim |\psi(x,y,z)|^2 dV$$

$U(r,t) = \hat{F}\psi(r,t)$ - это определение оператора.

$$\bar{F} = \int \psi^* \hat{F}\psi dV$$

Соотношение между операторами такое же, как между величинами в классической физике. Если возьмем нерелятивистский случай, то энергия

$$E = \frac{p^2}{2m}$$

В квантовой физике p меняют на оператор, квадрат оператора $\frac{\hat{p}^2}{2m}$ и получаю оператор, который описывает энергию, гамильтониан.

Рассмотрим уравнение Шредингера:

$$i\hbar \frac{\partial \psi(r,t)}{\partial t} = \hat{H}\psi(r,t)$$

где $\hat{H}$ - оператор Гамильтона. Записано следующее: есть волновая функция, под действием оператора она будет меняться. Точно так же в классической физике: если частица находится в потенциальном поле, если перейдет в друю точку (U меняется, F меняется), то получит ускорение. Изменение волновой функции определяется оператором Гамильтона – это сумма потенциальной и кинетической энергии, т.е. оператор полной энергии системы:

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + U(r,t)$$

Почему уравнение Шредингера содержит мнимую единицу?

Для одномерного движения волновое уравнение выглядит так:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

v- скорость распространения волны. Тут стоит вторая производная по времени и координате. Это невозможно использовать, потому что для того, чтобы определить волновую функцию, надо задать 2 параметра: значение волновой функции в нулевой момент и начальные значения скорости.

Шредингер получил уравнение:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi + U\psi$$

Но волновая функция стала комплексной, $e^{i\varphi}$.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Таким образом, первое уравнение оказалось правильным, и из уравнения Шредингера возникает комлексная величина i. Она возникакет из необходимости согласовать первую производную по времени со второй производной по координате. Представьте себе, что U – потенциал постоянный, тогда она изменяться не будет, все это приведет к тому, что получим стационарное уравнение Шредингера:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\psi}{dx^2} + U\psi(x) = E\psi(x)$$

$\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\psi}{dx^2}$ - это кинетическая энергия, E – это энергия, которая должна соответствовать решению данного уравнения, данной волновой функции.

Оператор Гамильтона может быть как дискретный, так и непрерывный спектр энергии:

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0$$

Рассмотрим пример. Имеется бесконечная яма (Рисунок 39). Частица может находиться только в ее пределах.

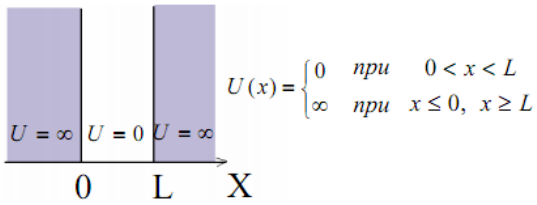


Рисунок 39. Бесконечная потенциальная яма

Вероятность нахождения частицы на любом интервале от 0 до L оказывается одинаковой. Потому, что с одинаковой скоростью она ходит взад-вперед.
Уравнение Шредингера нам говорит:

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0$$

U – потенциальная энергия (за пределами ямы она бесконечна), раз мы так ее определили, то мы с самого начала заперли частицу в пределах ямы.

Так как волновая функция – непрерывная, то на границе области она тоже должна обраться в ноль.
В области $0 \le x \le L$:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{2mE}{\hbar^2}\psi$$

Решения этого уравнения:

$$\psi = A \sin kx + B \cos kx$$

Где ввели обозначение $k = (2mE/\hbar^2)^{1/2}$
Волновая функция в двух точках 0 и L должна обратиться в ноль.
В точке 0 cos не равен нулю, поэтому нужно положить B=0. A sin kL=0

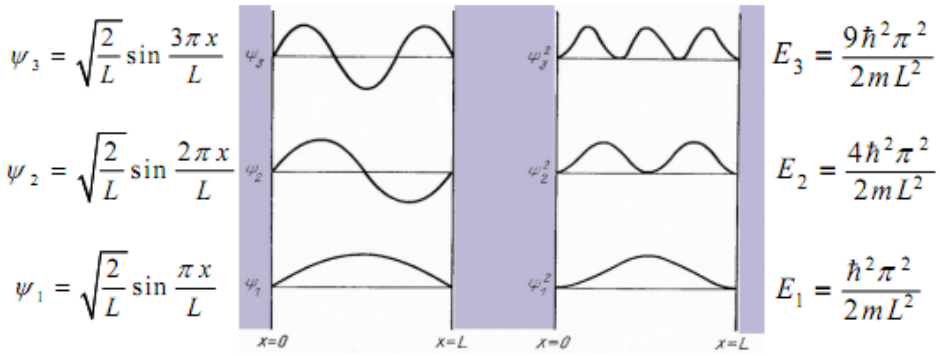
можно положить коэффициент A=0, но тогда получим, что частицы в яме нет. Поэтому положим, что нулю равен sin kL=0. Синус равен нулю, если

$kL = \pi n, \quad n=1,2,3\ldots$

При определенных значениях n=1,2,3… получаем дискретный набор энергий E_n

$$E_n = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2mL^2}$$

На рисунке видим набор энергий по уровням. Волновая функция – синус.



Если у квантовой частицы от одной стенки до другой пространство ограничено, то с наибольшей вероятностью мы увидим ее в центре, если частица находится в низшем состоянии, а по краям 0. Если находится в первом возбужденном состоянии, то по краям ноль, но максимум будет в другом месте, и так как надо возвести в квадрат, то в центре пребывание равно нулю. Имеем 2 максимума.

Вырождение

Рассмотрим движение в трехмерном пространствев виде кубика со стороной L. Частица будет независимо колебаться по оси x, y, z. Тогда волновая функция есть:

$$\psi(x,y,z)=\psi_1(x)\psi_2(y)\psi_3(z)$$
$$\psi(x,y,z) = A\sin k_1 x \sin k_2 y \sin k_3 z$$
$$E = \frac{\hbar^2}{2m}(k_1^2 + k_2^2 + k_3^2) = \frac{(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)}{2m}$$
$$E_{n_1 n_2 n_3} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2mL^2}(n_1^2 + n_2^2 + n_3^2)$$

Энергия будет определяться квантовыми числами, которые у нас были, n_1, n_2, n_3, эти числа независимые.

Когда мы рассматривали прямоугольную яму, то единственный параметр, который у меня был для описания спектра, было число n. Я получал первый уровень, подставлял n=2: $2^2 = 4$ - второй уровень, $3^2 = 9$ - третий уровень.

Волновая функция ψ определяется синусами трех величин. Если n=1, то получаем уровень $E_{111} = 3E_1$. Представим, что $n_1 = 1$, $n_2 = 2$ $n_3 = 1$, то уроыень будет 6E. Но волновые функции будут разные. Потому что

$$\psi_{211} = A\sin\frac{2\pi x}{L}\sin\frac{\pi y}{L}\sin\frac{\pi z}{L}$$

Одна волна и две полуволны (2,1,1). Теперь ничего не изменится, если поставить сначала полуволну, потом волну, потом полуволну (1,2,1), третий вариант – 1,1,2. Энергия одна и та же, а волновые функции разные. То есть вырождение появляется: одной и той же энергии соответствуют 3 разные волновые функции. Хочется избавиться от этого. Как? Параллелепипед, стороны L. Вместо трех линий имеем расщепление: по три линии. Волновые функции будут однозначные. С одной стороны имеем вырождение, все линии энергии оказываются одинаковые, но волновые функции, которые описывают состояние, разные. Это называем вырождением.

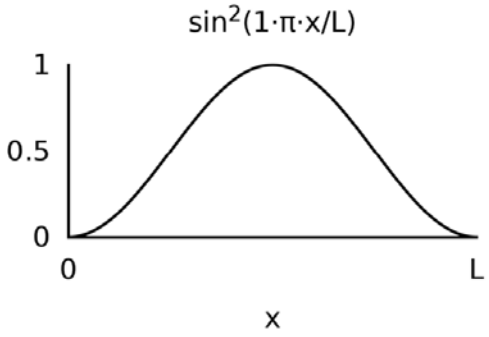


Рисунок 40. Одна полуволна

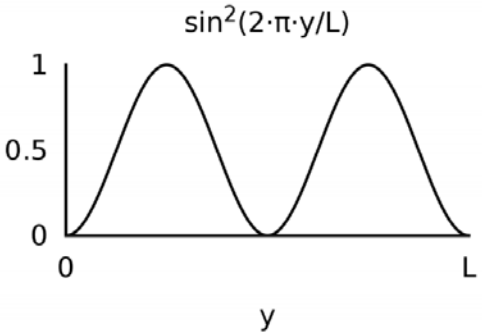


Рисунок 41. Две полуволны

Квадрат модуля волновой функции максимален посередине, по краям нули, одна полуволна (Рисунок 40). Второй случай (Рисунок 41) – две полуволны. Волна будет синус, а если возведем в квадрат, то получим так. Два максимума.

Волновая функция будет вести себя так: полезет наверх, достигла максимума, упала, снова полезла и снова упала. Это поведение волновой функции.

Переходим к бесконечности (Рисунок 42). Возьмем число 30.

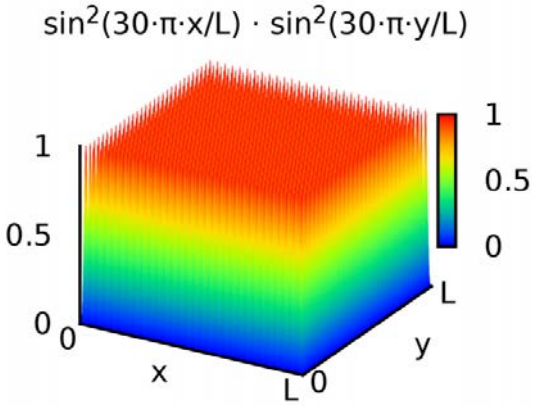


Рисунок 42. Волновая функция для большого числа полуволн.

Если вместо 30 поставим 150, то волн видно не будет, хотя они есть. Это классический случай. Вероятность везде одинаковая.

Если вы берете спектр и увеличиваете квантовое число n, то наверху, при больших n, вы оказываетесь в классическом мире, а не квантовом.

Связанные состояния

Если яма конечна, то в ней только 3 уровня находятся (Рисунок 43). Четвертый уровень находится вне ямы.

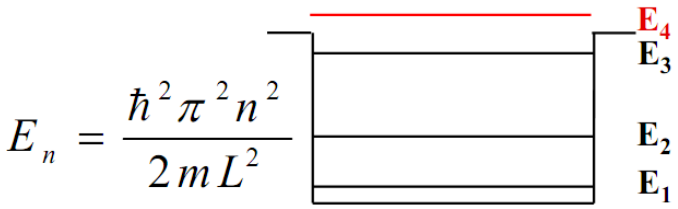


Рисунок 43. Энергетические уровни ямы

Если на каждом уровне будет находиться частица, то в такую яму можно посадить 3 частицы, четвертая уже из ямы выскочит. У трех частиц будет потенциал, который будет определяться дискретными набором энергий E_n. У вас будут три уровня, на которые вы можете посадить по одной частице. Спектр в этом случае тоже дискретный.

Рассмотрим пример. Вычислить допустимые уровни энергии электрона, находящегося в прямоугольной потенциальной яме шириной 10^{-8} см, протона, находящегося в потенциальной яме 5 Фм, и шарика массой 1 г, находящегося в потенциальной яме шириной 1 см.

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2mL^2}$$

$$n = 1,2,3, \ldots$$

L – ширина потенциальной ямы.

Далее подставляем:

Электрон ($mc^2 = 0{,}511$ *МэВ*, $L = 10^{-8}$ *см*):

$$E_n = \frac{(197)^2\ \text{МэВ}^2 \cdot \text{Фм}^2 \cdot (3{,}14)^2}{2 \cdot 0{,}511\ \text{МэВ} \cdot (10)^5\ \text{Фм}^2} n^2 = 32{,}9n^2\ \text{эВ}.$$

Возьмем n=1, первый уровень.Атом водорода. Энергия связи атома водорода 13,6 эВ, а я получил 30.

Протон ($mc^2 = 938{,}3$ *МэВ*, $L = 5$ *Фм*):

$$E_n = \frac{(197)^2\ \text{МэВ}^2 \cdot \text{Фм}^2 \cdot (3{,}14)^2}{2 \cdot 938{,}3\ \text{МэВ} \cdot (5)^5\ \text{Фм}^2} n^2 = 8{,}5n^2\ \text{МэВ}.$$

Переходим к шарикам.

Шарик ($m = 1$ *г*, $L = 1$ *см*):

$$E_n = \frac{(197)^2\ \text{МэВ}^2 \cdot \text{Фм}^2 \cdot (3{,}14)^2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot (3 \cdot 10^{10}\ \text{см/сек})^2 \cdot (10^{13})^2\ \text{Фм}^2} n^2 = 3{,}4 \cdot 10^{-42} n^2\ \text{эВ}.$$

Первый уровень 10^{-42}эВ. Отсюда получается непрерывный спектр. Если положить шарик в яму, он туда опустится на дно. В квантовой физике работает принцип неопределенности, поэтому частица будет лежать не на дне, а поднята над ним.

Гамильтониан.

Чтобы описывать разные системы, нужно правильно записать гамильтониан. Общий вид гамильтониана – это сумма оператора кинетической энергии и потенциальной энергии.

$$\hat{H} = \hat{E} + \hat{U}$$

У свободной частицы U=0:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta$$

Частицы в одномерной потенциальной яме с энернией U(x):

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{d^2}{dx^2}\right) + u(x), \quad 0 \le x \le L$$

Гармонический осциллятор (маятник), ω −частота колебаний:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{d^2}{dx^2}\right) + \frac{m\omega^2 x^2}{2}$$

Атом водорода, для электрона энергия – это кинетическая и кулоновского взаимодействия:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta - \frac{e^2}{r}$$

Атом гелия: это ядро, состоящее из 2 протонов, двух нейтронов, вокруг него 2 электрона. Энергия – это сумма кинетических энергий двух электронов, взамодействие электрона с ядром, второго с ядром и электроны межу собой взаимодействуют, r_{12} − расстояние между электронами:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta_1 - \frac{\hbar^2}{2m}\Delta_2 - \frac{2e^2}{r_1} + \frac{e^2}{r_{12}}$$

Решаете это уравнение и получите спектр атома гелия.

Классический гармонический осциллятор.

Классический нармонический осциллятор – это некая область, в которой что-то колеблется. Для этого нужна возвращающая сила. Возвращающая сила F=−kx.

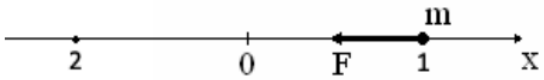


Рисунок 43. Гармонический осциллятор

Уравнение движения: $m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx$

Закон сохраннения энергии: сумма кинетической и потенциальной энергии постоянна

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = F = const$$

Обозначим $\omega^2 = \frac{k}{m}$

Решение уравнения движения определяет положение частицы в зависимости от времени:

$$x = A\cos\omega t$$

Начальные условия t=o, x=L, v=0

$$E_{кл} = \frac{1}{2}mL^2\omega^2\sin^2\omega t + \frac{1}{2}kL^2\cos^2\omega t$$

Максимальная вероятность увидеть частицу в крайних точках. Зависимость координаты и скорости частицы от времени

$$x(t) = L\cos\omega t$$
$$v(t) = -L\omega\sin\omega t$$

В крайних положениях частица имеет максимальное значение потенциальной энергии:

$$E = \frac{1}{2}mL^2\omega^2$$

В нижней точке она имеет максимальную кинетическую энергию:

$$E = \frac{1}{2}mL^2\omega^2$$

Квантовый осциллятор

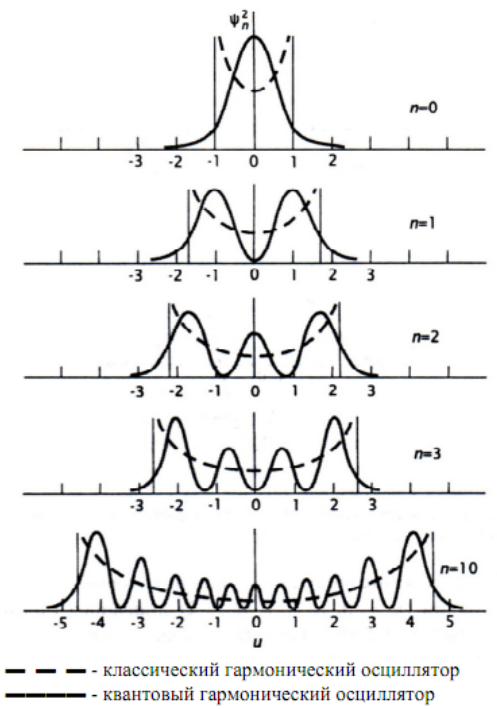
Мы не можем написать $\bar{F} = m\bar{a}$ потому что частица не движется по траектории. Возьмем уравнение Шредингера и поставим туда оператор Гамильтона, который описывает движение гармонического осциллятора.

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{m\omega^2x^2}{2}\psi = E\psi$$

Подставляем оператор и находим энергии.

Основное отличие от бесконечной потенциальной ямы в том, что в бесконечной потенциальной яме мы говорим, что значение на границе рано нулю. Здесь такого условия нет. Когда начинаем строить решения, нужно помнить, что это гармонический осциллятор и на бесконечности должен быть ноль. Отличия гармонического и квантового осциллятора можем видеть на картинке (Рисунок 44). При n=0 у квантового осциллятора есть максимум волновой функции посередине, у гармонического – максимумы на краях (так как скорость маленькая). Это происходит потому, что у квантового осциллятора есть аналогия с частицей, запертой в потенциальной яме. Если n=1, n=2, то получаем что-то синусоидальное. Дальше, по мере увеличения n, мы приближаемся к классическому случаю: максимум на ходится на границе времяпребывания осциллятора, а у нас здесь тоже волновая функция будет иметь максимумы на границе. Квантовая механика в пределе сошлась с классической.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ



Каждому энергетическому состоянию соответствует волновая функция, описываемая полиномом Эрмита H_n.

$$\Psi_n = \left(\frac{a}{\sqrt{\pi}\,2^n n!}\right)^{1/2} H_n(ax)e^{-a^2x^2/2}$$

$$H_n = (-1)^n e^{\xi^2}\frac{d^n}{d\xi^n}(e^{-\xi^2})$$

где $a^2 = 4\pi^2 m\omega/\hbar$, $\xi = ax$. В таблице приведены собственные значения энергии E_n и нормированные собственные функции гармонического осциллятора Ψ_n

n	Собственные значения энергии E_n	Нормированные собственные функции E_n
0	$E_0 = \hbar\omega/2$	$\Psi_0 = \left(\frac{a}{\sqrt{\pi}}\right)^{1/2} e^{-a^2x^2/2}$
1	$E_0 = 3\hbar\omega/2$	$\Psi_1 = \left(\frac{a}{2\sqrt{\pi}}\right)^{1/2} 2axe^{-a^2x^2/2}$
2	$E_0 = 5\hbar\omega/2$	$\Psi_2 = \left(\frac{a}{8\sqrt{\pi}}\right)^{1/2} (4a^2x^2-2)e^{-a^2x^2/2}$
3	$E_0 = 7\hbar\omega/2$	$\Psi_3 = \left(\frac{a}{48\sqrt{\pi}}\right)^{1/2} (8a^3x^3-12ax)e^{-a^2x^2/2}$
n	$E_n = (n+1/2)\hbar\omega$	$\Psi_n = \left(\frac{a}{\sqrt{\pi}\,2^n n!}\right)^{1/2} H_n(ax)e^{-a^2x^2/2}$

Рисунок 44. Отличия гармонического и квантового осцилляторов.

Посмотрите на спектр энергии. Он совсем другой, другая потенциальная энергия. Спектр будет дискретным, расстояния между уровнями будут одинаковыми.
Эти два примера говорят о том, что если мы исходим из того, что уравнение Шредингера правильное (а это так). только в одном случае, если частица нерелятивисткая и $E = \frac{p^2}{m}$.
Релятивистская частица: $E^2 = c^2p^2 + m_0{}^2c^4$
Поэтому уравнение Шредингера работает в нерелятивистской области.
За счет чего ограничивать область и не дать частице уйти на бесконечность? За счет члена $e^{(-a^2x^2/2)}$, этот член везде присутствует и будет обрезать вероятность того, что частица улетит на бесконечность. Она будет находиться внутри действия силы гармонического осциллятора.

Прямоугольные и сферические системы координат

Переходим к сферической системе координат (Рисунок 45).

В прямоугольной системе координат мы работает с (x,y,z), а в сферической – (r,θ, φ). Переписываем уравнение Шредингера, оно зависит от трех параметров: r,θ, φ.

$$-\frac{\hbar^2}{2M}\left[\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial\psi}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\psi}{\partial\theta}\right) + \frac{1}{r^2\sin^2\theta}\frac{\partial^2\psi}{\partial\varphi^2}\right] + U(r)\psi = E\psi$$

Если сферическая система координат, то частица не будет чувствовать, как она крутится, поэтому будет вырождение. А волновая функция будет зависеть от (r,n,l), где

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

l – это орбитальный момент, с которым крутится частица, n – главное квантовое число. Нам удалось разделить переменные по θ и φ.

$$\psi(r,\theta,\varphi) = R_{nl}(r)Y_{nl}(\theta,\varphi)$$

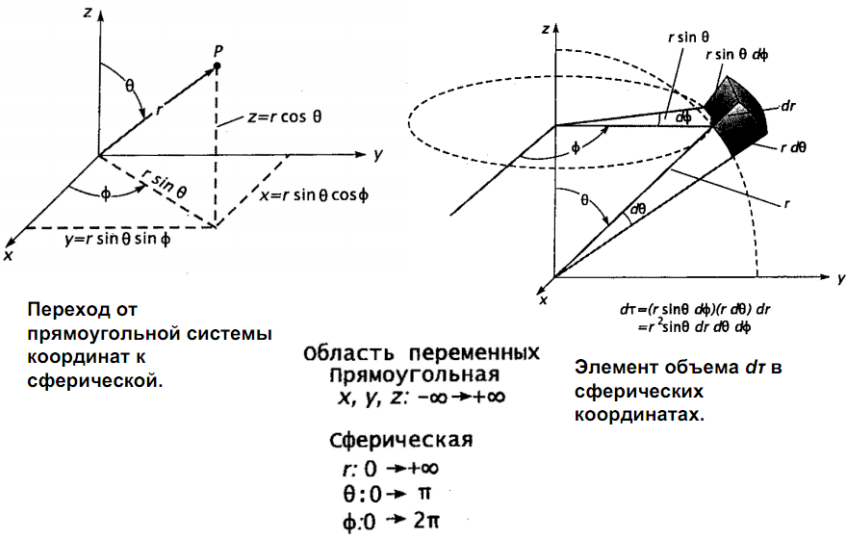


Рисунок 45. Переход из прямоугольной в сферическую систему координат

Орбитальный момент количества движения. Проекция орбитального момента.

Имеется центр, и частица движется с определенным значением орбитального момента. Квантуется как сам орбитальный момент, так и его прекция на выделенное направление z.

Собственные значения операторов $\widehat{L^2}$ и $\widehat{L_z}$ являются решением операторных уравнений

$$\widehat{L^2}Y_{lm}(\theta,\varphi) = L^2Y_{lm}(\theta,\varphi)$$
$$\widehat{L_z}Y_{lm}(\theta,\varphi) = L_zY_{lm}(\theta,\varphi)$$

Они имеют дискретные значения:

$$L^2 = \hbar^2 l(l+1), \text{ где } l=0,1,2,3\ldots$$
$$L_z = \hbar m, \text{ где } m=0,\pm1,\pm2,\pm3,\ldots,\pm l$$

(потому что может быть 2 типа вращения, проекция будет либо положительная, либо отрицательная).

Когда говорят, что орбительный момент количества движения равняется 2, это значит, что l=2. Но на самом деле его надо считать: $L^2 = \hbar^2 2(2+1)$.

Сферические функции будут выглядеть так:

$$Y_{lm}(\theta,\varphi) = (-1)^m \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi}\frac{(l-|m|)!}{(l+|m|)!}} e^{im\varphi} P_l^m(\cos\theta)$$

Где $P_l^m(\cos\theta)$ – функция Лежандра.

Величина орбитального момента количества движения L дается соотношением

$$L = \hbar\sqrt{l(l+1)}$$

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

$l = 0$	*s*–состояние
$l = 1$	*p*–состояние
$l = 2$	*d*–состояние
$l = 3$	*f*–состояние
$l = 4$	*g*–состояние
$l = 5$	*h*–состояние
и. т. д.	

Рисунок 46. Буквенные обозначения орбитальных моментов

Буквенные обозначения соответствуют разным значениям орбитального момента.

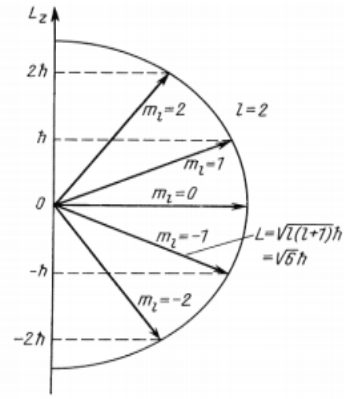


Рисунок 47. Вычисление момента количества движения

Если l=2, то проекции (Рисунок 47) могут быть +2, +1, 0, -1, -2. Видите, 2*2+1 , 5 значений проекции. Орбитальный момент количества движения всегда имеет квантовое число целое 0,1,2,3,4,5. Это правило квантовой теории. А m меняется от 0 до l.

Рассмотрим атом водорода (Рисунок 48). Какие у него будут состояния?

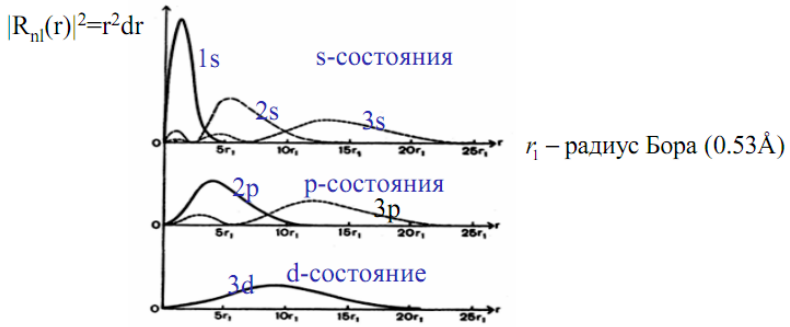
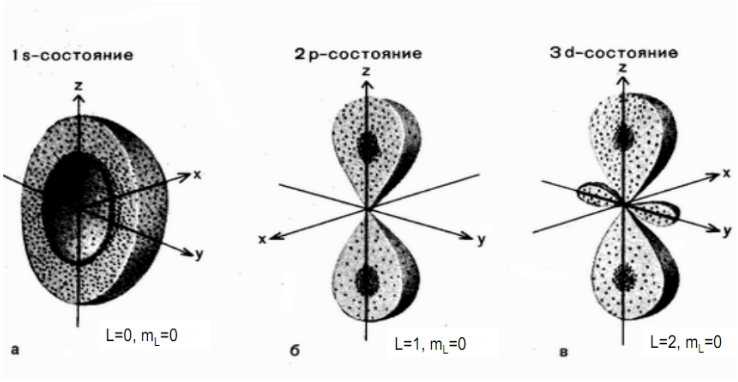


Рисунок 48. Состояния атома водорода

Что значит 3s- состояние? Это значит, третий уровень с орбитальным моментом количества движения l=0.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ



Распределение полной вероятности $|R_{nl}(r)\,Y_{lm}(\theta,\varphi)|^2 r^2 dr d\Omega$ нахождения электрона в атоме водорода, определяемое угловой и радиальной плотностью вероятности.

Рисунок 494. Распределение полной вероятности нахождения электрона в атоме водорода

Частица в поле с центральной симметрией. Полный момент количества движения.

$$\psi(r,\theta,\varphi) = R_{nl}(r)Y_{nl}(\theta,\varphi)$$

Угловая часть волновой функции характеризуется E - энергией (определяется числом n), $L^2 = \hbar^2 l(l+1)$ - квадрат орбитального момента (как частица крутится вокруг центра) и $L_z = \hbar m$ - значение его проекции, n – меняется от 1 до ∞, l=0,1,2,3… и для каждого l будет значение m, $m=0,\pm1,\pm2,\pm3,\ldots,\pm l$.

Спин точно такая же характеристика, как и электрический заряд, масса. Когда я говорю электрон, то это: легкая частица, с массой 0,5 МэВ, имеет электрический заряд (-1), спин 1\2. Чтобы получить полный момент количества движения, нужно к l - орбитальный момент прибавить s – спин. Но прибавить по правилам квантовой физики:

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

Для электрона s=1/2, я беру если я беру l=2, то будет (2+1/2) и (2-1/2).
В соответствии с общими правилами для квантовых векторов проекция полного момента на выделенную ось (z) может принимать значения (2j+1) значение.
Все меняется через единицу, спин – внутреннее свойство частицы, он не меняется (у фотона спин 1, у пи-мезона равен 0, у электрна, протона, нейтрона равен ½).

Если спин частицы полуцелый, то она фермион, волновая функция должна быть антисимметричной. Волновые функции могут быть либо симметричными, либа антисимметричными. Симметричные волновые функции – это когда частицы имеют целый спин (это фотоны, пи-мезоны), а антисимметричные – это когда нецелый (3/2, 5/2 и т.д).

Квантовые состояния. Учет спина.

Я буду характеризовать систему энергией, полным моментом количества движения и проекцией полного момента количества движения (а это будет четность, а

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

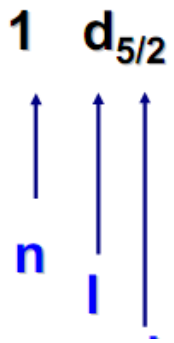


Рисунок 50. Пример квантового состояния

она определяется орбитальным моментом). Четное l будет приводить к четному значению состояния. Если у меня состояние $1d_{5/2}$, это означает, что

n=1, d=l, $j=5/2$.

Так определяется квантовое состояние с учетом спина (Рисунок 50). Потому что когда ввели спин, нарушили симметрию.

Принцип Паули.

Принцип Паули заключается в том, что в одном квантовом состоянии может находиться только один фермион. Берем состояния, смотрим, какие там будут значение E, n, l, m, j, j_z и, соответственно, столько частиц туда сажаю.

Давайте возьмем 1s –состояние, первое состояние с l=0, спин электрона ½, частицы могут быть с j=1/2 (потому что l=0, 0+1/2=1/2), ½ может иметь проекцию ½ и -1/2. Все, на уровень 1s я могу посадить 2 электрона, следующий электрон сядет на другой уровень. Отсюда получаем периодическую систему химических элементов Менделеева потому, что когда вы берете тяжелое ядро, все низшие состояния будут близко притягиваться к ядру, будут заполнены, а внешние электроны, сколько туда сядет – будет определяться зарядом ядра. Эти внешние электроны одного атома будут взаимодействовать с внешними электронами другого атома, это будет приводить к тому, что появляются сложные молекулы.

Оболочечная модель ядра

Аналогичная ситуация должна быть и в ядрах, потому что там тоже фермионы. Мы имеем потенциальную яму (Рисунок 51), в которой имеются уровни, они характеризуются определенным значением n, l, j. Дальше я сажаю туда частицы и получаю строение атомного ядра.

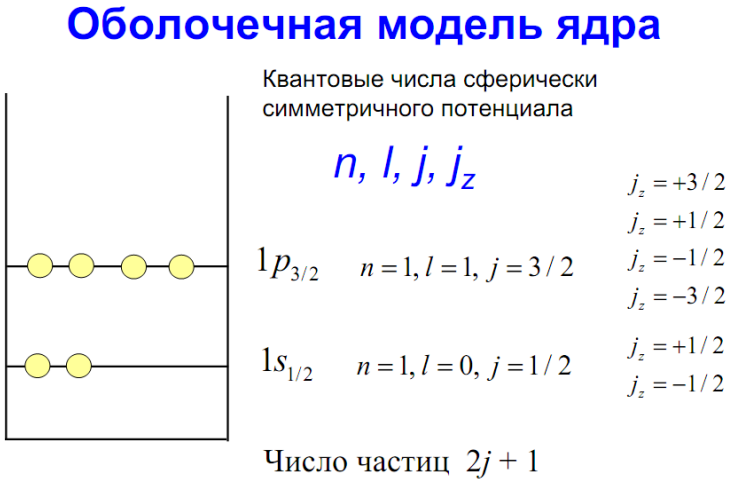


Рисунок 51. Оболочечная модель ядра

Лекция 5. Фундаментальные взаимодействия и лептоны.

Взаимодействия.

Чтобы понять, как устроен квантовый мир, нужно понять, какие же элементарные частицы, кубики, из которых строится этот мир. Этими кубиками являются фундаментальные частицы стандартной модели: e^-, ν_e $\mu^-, \nu_\mu, \tau^-, \nu_\tau$. Кварки, из которых построен окружающий мир – это u, d, c, s, t, b - основная масса связана с ними. Если есть частицы, то надо понять, как они между собой взаимодействуют. В квантовом миру существуют частицы, которые переносят взаимодействия. Это 8 g (цветных глюонов), γ, W^+, W^-, Z бозоны и H – бозон Хиггса, который позволил объяснить, откуда берутся массы фундаментальных частиц.

Если говорить о взаимодействии в классической физике, то есть 2 понятия:

- Близкодействие – на этом понятии построена вся классическая физика. Для того, чтобы какой-то предмет двигался, в соответствии с законом Ньютона, мы должны его толкнуть, т.е. коснуться и дать ему импульс.

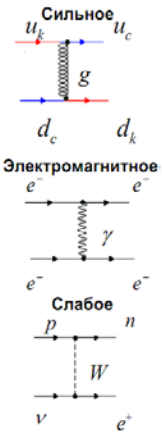
Когда узнали, что есть электродинамика, что есть магнитное поле, которое может передавать взаимодействие на расстоянии, то появилась другая концепция -

- Дальнодействие. Гравитационное и электромагнитное взаимодействие связаны с тем, что есть дальнодействие. Одна масса создает поле и в этом поле движется другая частица (электрическое, магнитное и гравитационное поле). Но с гравитационным полем ситуация сейчас изменилась. Есть общая теория относительности, там нет понятия поля, там имеется пространство-время.

Мы имеем разные частицы, которые переносят взаимодействие, которые приводят к тому, что частицы сближаются, расталкиваются и т.д. В квантовой физике ситуация сложнее, так как есть частицы, которые переносят взаимодействие. Это 8 g (цветных глюонов), γ, W^+, W^-, Z бозоны и H – бозон Хиггса.

Фундаментальные взаимодействия. Калибровочные бозоны

Взаимодействие	На какие частицы действует	Калибровочные бозоны
Сильное	Все цветные частицы	8 безмассовых глюонов, спин J = 1
Электромагнитное	Все электрически заряженные частицы	Безмассовый фотон, спин J = 1
Слабое	Кварки, лептоны, калибровочные бозоны $W^\pm$, Z	Массивные бозоны W^+, W^-, Z, спин J = 1, $m_W c^2 \approx 80$ ГэВ, $m_Z c^2 \approx 91$ ГэВ
Гравитационное	Все частицы	Безмассовый гравитон, спин J = 2



Источником калибровочных бозонов являются заряды соответствующих фундаментальных взаимодействий.

Рисунок 52. Фундаментальные взаимодействия. Калибровочные бозоны

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Электромагнитное взаимодействие переносит безмассовый фотон, слабое взаимодействие переносят три калибровочных бозона (W^+, W^-, Z). Важно, что W^+, W^- имеют массу, причем большую (80 и 90 ГэВ). Для сравнения: у протона масса примерно 1 ГэВ, почти в 100 раз тяжелее протона. В гравитационном взаимодействии участвуют все частицы, переносит его безмассовый гравитон с J=2. Обычно говорят, что гравитационное взаиможействие не играет большой роли в физике элементарных частиц. Но это неправильно. Оно приводит к тому, что появляются новые частицы, благодаря ему горит Солнце, происходит ядерная реакция.

Откуда взялось сильное взаимодействие? Возьмем 2 протона. Гравитационное взаимодействие двух протонов будет определяться массами первого и второго протона и квадратом расстояния между протонами. Кулоновское взаимодействие будет определяться зарядами протонов, деленное на r^2. r^2 сокращается и отношение кулоновского взаимодействия к гравитационному будет:

$$\frac{F_{грав}}{F_{кул}} = \frac{G\frac{m_1 m_1}{r^2}}{\frac{q_1 q_2}{r^2}} \approx 10^{-36}$$

Как тогда связаны между собой протоны и нейтроны внутри ядра? Нейтрон имеет электрический заряд 0, протон имеет электрический заряд (+1), они должны расталкиваться, развалить ядро. Но ядро – это связанная система. Мы были вынуждены говорить, что кроме этих двух взаимодействий в классической физике, существует еще сильное взаимодействие. Тогда его назвали сильным, а сейчас правильно его называть ядерным взаимодействием. Это взаимодействие, которое свяхывает между собой протоны и нейтроны внутри ядра. Оно не дает электромагнитному взаимодействию развалить ядро.

Электромагнитное взаимодействие на 36 порядков больше, чем гравитационное. В обычных условиях электромагнитное взаимодействие проявляется так: есть ядро, оно положительно заряжено, оно тянет на себя электрноы, электроны обволакивают ядро. Какой заряд у ядра, столько электронов оно притягивает. Заряд ядра положительный, а электронов – отрицательный. Этот атом, который имеет размер $\sim 10^{-8}$см, замыкает электромагнитное взаимодействие. Оно существует в области 10^{-8}см, когда вы выходите за пределы этой области, вы его не ощущаете. Сильное взаимодействие еще более сильное, но оно имеет еще меньший радиус действия, порядка одного ферми. Если вы уйдете на расстояние порядка 10 фм, никакого сильного взаимодействия не почувствуете.

Квантовые частицы могут рождаться и умирать. С помощью потенциала описать рождение частиц нельзя. Поэтому в квантовом мире вводится понятие амплитуды взаимодействия, которая определяет рождение и уничтожение частиц. На практике то выглядит так:

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

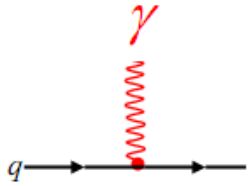


Рисунок 53. Электромагнитное взаимодействие

Имеется летящий кварк (Рисунок 53), он может испустить γ – квант. Это электромагнитное взаимодействие.

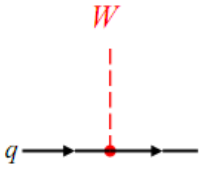


Рисунок 54. Слабое взаимодействие

Имеется кварк, он может испустить W-бозон, кварк тоже будет меняться (Рисунок 54).

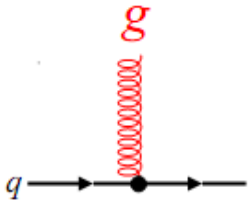


Рисунок 55. Сильное взаимодействие

Кварк, который испустил один из глюонов. Дальше остается кварк и глюон (Рисунок 55).

Описывается это методом диаграмм Фейнмана. Он основан на том, что имеется вершина, мы знаем амплитуду взаимодействия между кварком и гамма-квантом, бозоном и глюоном, взаимодействие будет определяться тем, какая у вас вероятность взаимодействия в вершине.

Мы знаем, что в квантовом мире появляются и исчезают виртуальные частицы. Мы должны эти виртуальные частицы включить в это взаимодействие. У вас летит электрон, он виртуально родил фотон, потом полетел, дальше снова захватился электроном и дальше полетел.

Механизм взаимодействия частиц.

Из соотношения неопределенности

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar,$$
$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar$$

Важно, что если есть виртуальная частица, то для нее нарушается соотношение:

$$E \neq (p^2c^2 + m^2c^4)^{1/2}$$

Радиус взаимодействия:

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

$$R = \hbar/mc$$

То есть определяется массой частицы, которая переносит взаимодействие, и двумя мировыми константами ħ и c. Радиус действия сил имеет фундаментальное значение. У вас будет W-бозон, который имеет 80 ГэВ, радиус действия маленький, 10^{-15}см, будет π-мезон, у которого масса другая, и радиус взаимодействия будет порядка 10^{-13}см. Это будет определяться массой частицы, которая переносит взаимодействие. Если безмассовый фотон или гравитон, то радиус действия будет бесконечным.

Локальное взаимодействие в точке. Виртуальные частицы.

Запишем соотношение неопределенности

$$\Delta T \cdot \Delta E \approx \hbar$$
$$mc^2 \cdot T \approx \hbar$$

Радиус действия ядерных сил:

$$R = \hbar/mc$$

Имеется частица, в точке она испускает другую частицу и продолжает жизнь (Рисунок 56) в каком-то другом качестве. Частица является фермионом (спин полуцелый). Бозон имеет целый спин или ноль, а фотон имеет спин 1, а π-мезон имеет спин равный нулю.

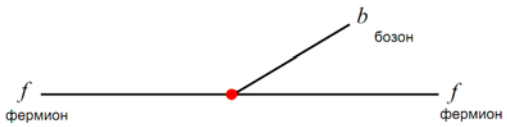


Рисунок 56. Схема задачи

Имеется три типа взаимодействия. Рассмотрим электромагнитное взаимодействие. Вершина этого взаимодействия (Рисунок 57).

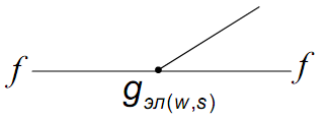


Рисунок 57. Схема электромагнитного взаимодействия

Амплитуда этого взаимодействия определяется: $\alpha_e = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$, определяется двумя мировыми константами.

Элементарная амплитуда равна: $g_{эл} = \sqrt{\alpha_e}$

Элементарная амплитуда слабого взаимодействия связана с W и Z-бозонами, она будет меньше, чем амплитуда электромагнитного взаимодействия: $g_w = \sqrt{\alpha_w}$

Элементарная амплитуда сильного взаимодействия $g_s = \sqrt{\alpha_s}$ порядка единицы.

Вершины электромагнитного взаимодействия.

Ось времени идет горизонтально слева направо.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

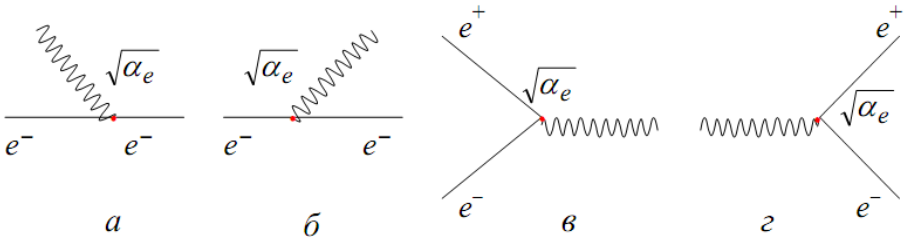


Рисунок 58. Диаграммы электромагнитного взаимодействия

На рисунке (Рисунок 58) а) есть электрон и фотон, в точке электрон провзаимодействовал с фотоном и поглотил его, амплитуда взаимодействия будет $\alpha_e = \sqrt{\frac{1}{137}}$, на второй диаграмме б) электрон испустил фотон, вершина та же самая. Теперь поворачиваю хвостик (рисунок с)), позитрон провзаимодействовал с электроном, родился фотон, в вершине стоит $\alpha_e = \sqrt{\frac{1}{137}}$. Или такой процесс: фотон рождает электрон-позитронную пару, константа та же сама. Т.о. амплитуда, которая стоит в вершине, не зависит от того, как вы крутите вершину.
Что я могу получить, вращая вершины? Поверну хвостик таким образом (Рисунок 75):

Рисунок 59. Рождение или поглощение в вакууме

Сначало ничего не было, вакуум. Вдруг рождается электрон-позитронная пара и фотон. Справа: был фотон, электрон-позитронная пара, они исчезли и снова появился вакуум. Любая частица, которая летит через вакуум, с ним взаимодействует.

Пример: фотоэффект (Рисунок 60). Поглощение гамма-кванта атомом с вылетом одного из атомных электронов. Летит электрон, летит гамма-квант, они провзаимодействовали, гамма-квант поглотился и остался электрон. Но свободный электрон не может поглотить фотон. Почему он поглощает? Потому что есть еще одна вершина, электрон превратился в виртуальную частицу, за счет гамма-кванта он взаимодействует с ядром, который имеет положительный заряд. Это электромагнитное взаимодействие. Летит гамма-квант, во второй вершине электрон превращается в виртуальную частицу, дальше он провзаимодействовал с гамма-квантом и образовался реальный электрон, который полетел вправо, и ядро, а гамма-квант исчез.

Это же процесс может происходить по-другому. Есть электрон. В точке он провзаимодействовал с гамма-квантом, родился виртуальный электрон, он отдал гамма-квант ядру, в результате обмена получился реальный электрон.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

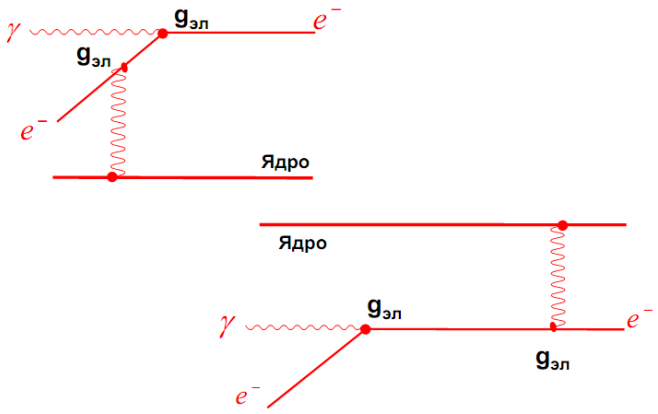


Рисунок 605. Диаграммы Фейнмана для фотоэффекта

Если вы хотите правильно посчитать сечение фотоэффекта, вы должны и одну диаграмму сосчитать, и вторую. Фотон может родить пару $e^- - e^+$, тогда будет гамма-квант, электрон, позитрон, которые аннигилируют. Если вы это учете, то на порядок увеличит точность подсчетов.

Двух- и трех-фотонная e^-e^+аннигиляция.

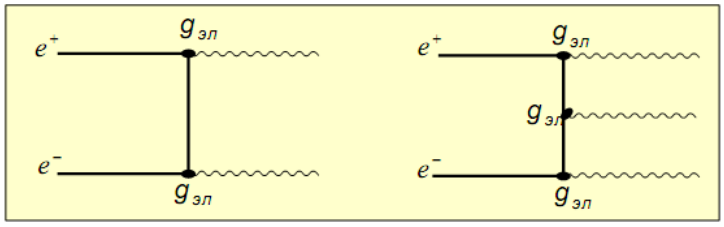


Рисунок 61. Электрон-позитронная аннигиляция

Не считая ничего (Рисунок 61), можно сказать, что однофотонная аннигиляция невозможна, в лучшем случаем может родиться пара гамма-квантов, вот виртуальные частицы, электрон и позитрон исчезли, появилось в конце 2 гамма-кванта. Но может родиться и 3 гамма-кванта. В средней точке может родиться еще один фотон, и получается трех-фотонная аннигиляция. В первом случае 2 вершины, во втором – три, в каждой вершине стоит $\sqrt{\frac{1}{137}}$, он определяет амплитуду этого процесса, а сечение будет квадрат амплитуды, то есть в 100 раз меньше. Трех-фотонная аннигиляция тоже возможна, но вероятность его будет в 100 раз реже.

$$\frac{A(2g_{эл})}{A(3g_{эл})} \sim \frac{1}{g_{эл}}$$

$$\sigma \approx A^2$$

$$\frac{\sigma(2\gamma)}{\sigma(3\gamma)} \approx \frac{1}{g_{эл}^2} \approx 100$$

Четырехфотонная аннигиляция вероятно еще в 100 раз меньше. Не проводя никаких расчетов, спрашиваем, какое будет соотношение сечений двух- и трех-

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

фотонной аннигиляции, вы говорите: тут 2 вершины, тут три, в каждой вершине стоит константа электромагнитного взаимодействия, и можно дать ответ.

Лептоны.

Давайте рассмотрим элементарные частицы, которые являются частицами, что определяют устройство мира (Рисунок 62).

Рисунок 62. Лептоны

Это лептоны. Каждый лептон имеет партнера: это нейтрино электронное, мюонное и тау-нейтрино. Известно, что экспериментально измерены массы частиц, и масса $\nu_e < 3$ эВ, $\nu_\mu < 0{,}19$ МэВ, $\nu_\tau < 18{,}2$ МэВ. Эти частицы имеют очень маленькую массу, но сумма их масс не равна нулю.

Как они взаимодействуют? Частицы в верхней строчке имеют отрицательный электрический заряд, поэтому они участвуют в электромагнитном взаимодействии. Нейтрино заряда не имеет, оно участвует только в слабом взаимодействии. Каждая имеет спин, равный половине, частицы являются фермионами.

Электрон.

Рассмотрим электрон Он был открыт Томсоном в 1897 году.
Когда в газе создается разряд, происходит отрывание электрона от атома (от типа газа не зависит), впервые Томсон показал, что атом – это не неделимая единица: из любого атома можно вырвать электрон. После этого начались детальные исследования электрона. Масса электрона известна с высокой точностью. Он имеет магнитный момент, время жизни $> 4{,}610^{26}$ лет, мы не можем обнаружить распад электрона. И две новые характеристики: лептонное число $L_e = 1$, $L_\tau = 0$, $L_\mu = 0$.

Как открывают частицы. Открытие позитрона.

Если заряженная частица проходит через среду, то она ее ионизирует, создает ионизацию. Гейгер придумал, что если пролетает частица заряженная и оставляет след, то возьмем потенциал высокий (+15 кВ), то, когда прилетит частица, произойдет пробой, проскочит искра, я ее увижу, могу сосчитать искры с помощью счетчика, тогда буду видеть заряженную частицу. Это первый метод: взять заряженный промежуток, пролетает частица, она создает цепочку искр, происходит разряд, и мы видим, что это

заряженная частица. Можно создать электрическое поле, которое будет искривлять траекторию частицу.

Вильсон изобрел камеру Вильсона. Берете объем, заполненный газом, меняете температуру и объем в этой газовой среде, чтобы газ оказался пересыщенным. Когда прилетит заряженная частица, она создаст капельки газа, вы их можете сфотографировать.

Далее 1932 год. Есть камера Вильсона, заполнена газом, летит частица, ведет себя как электрон, поворачивается в магнитном поле, массу мы определили. Андерсон сделал следующее: он поместил в камеру свинцовую пластинку, проходя через которую частица теряет часть энергии за счет того, что эта создает ионизацию, теряет энергию, выскакивает из пластинки, а радиус ее уменьшился.

Осталось только посмотреть, откуда в камеру Вильсона влетела частица. Если известно, откуда она влетела, то искривление ее в магнитном поле показывает, что ее масса точно такая же, как масса электрона, но заряд положительный. То есть это античастица электрона. Был открыт антимир. Сегодня известно, что каждая частица имеет античастицу. Электрон имеет античастицу позитрон (положительно заряжен), протон имеет античастицу – антипротон (заряд отрицательный). Мы приписали электрону заряд отрицательный, у протона будет положительный. А теперь сделаем наоборот: позитрону припишем положительный, электрону приписываю отрицательный.

Открытие антинейтрино.

Возникла проблема: есть нейтрон, он распадается, видим протон и электрон:

$$n \to p + e^- + \tilde{\nu_e}$$

Имеется ядро, которое переходит из состояния E_2 в E_1. Измеряю энергию электрона и вижу, что электрон должен иметь определенную энергию, а она оказывается такой.

Паули говорил, что дело в том, что наряду с двумя частицами есть еще одна, которую он назвал нейтрино (по-итальянски это маленький нейтрон). Тогда у вас трехчастичный распад, и электрон, протон и нейтрино будут делить между собой энергию. Так как протон – тяжелая частица, то основная энергия будет распределяться между электроном и нейтрино. В 1931 году он выдвинул такую гипотезу. В 1956 году Райнес и Коэн впервые зарегистрировали антинейтрино.

Регистрация нейтрино.

Частицу можно переносить с одной стороны взаимодействия в другую, но заменять на античастицу. Нейтрон распадается на протон, электрон и антинейтрино:

$$n \to p + e^- + \tilde{\nu_e}$$

Сделаем перенос – электрон заменяется на позитрон:

$$\tilde{\nu_e} + p \to n + e^+ \ (*)$$

Если рождается антинейтрино, то оно взаимодействует с протоном, должно дать позитрон и нейтрон. Так как сечения маленькие, до изобретения ядерных реакторов, до

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

получения больших потоков нейтрино (10^{16} нейтрино на $см^2$ в секунду), эту частицу было очень трудно поймать. Чтобы убедиться, что реакция (*) проходит, нужно зарегистрировать позитрон и нейтрон.

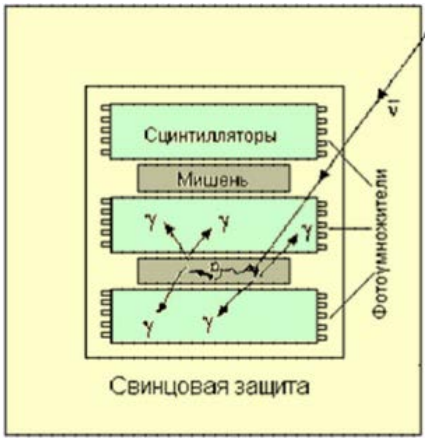


Рисунок 63. Эксперимент по обнаружению антинейтрино

Нужно взять реактор (Рисунок 63), который дает большое количество таких частиц, взять протоны (ядра водорода, взять воду, заполнить мишени водой), дальше облучать мишени нейтрино и рождается позитрон. Позитрон быстро взаимодействует с электроном, которых много вокруг, рождается вспышка – 2 гамма-кванта. Наблюдаем с помощью сцинтилляторов (когда гамма-квант попадает, возникает вспышка). Этот детектор был окружен сотней счетчиков, которые следили за вспышками. Причем вспышки должны были произойти одновременно. Нейтрон, который рождается, имеет энергию в несколько МэВ (1-5 МэВ). Сечение взаимодействия нейтроном порядка 0,1 барна (10^{-24}), он пройдет через установку, и мы ничего не увидим. Поэтому нейтроны стараются замедлить с помощью воды (ударяет по протону и теряет энергию), появляются нейтроны, которые имеют энергию эВ, а сечение взаимодействия этих нейтронов с веществом в миллион раз больше. Тогда нейтрон появляется в воде, помещают кадмий, который будет нейтроны быстро захватывать и (сечение взаимодействия там большое) получается возбужденный кадмий, он распадается с испусканием 3-5 гамма-квантов.

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

$$n + Cd(A) \rightarrow Cd(A+1)^* \rightarrow Cd(A+1) + (3-5)\gamma$$

Время, в течение которого они появляются после реакции, порядка 10-50 микросекунд. Это время замедления тоже было измерено. Было определено сечение: $\sigma(\tilde{\nu}p) = 10^{-43} см^2$. Обычное сечение взаимодействия нейтронов $10^{-24} см^2$. А тут на 20 порядков меньше. Вот почему нейтрино невозможно было поймать. Самый первый эксперимент продолжался 200 часов, включали реактор, что-то наблюдали, выключали реактор – что-то видели (фон). Снова включили и выключили. За 200 часов было зарегистрировано 567 случаев событий, из них фоновых событий было 200. А 360 –

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

примерное число событий, связанное с регистрацией нейтрино. Чтобы регистрировать нейтрино, нужны мощные источники нейтрино, чтобы детектор имел большие объемы.

Посмотрим задачу: определить длину L и время t свободного пробега реакторного нейтрино в воде, если $\sigma \approx 10^{-43}\text{см}^2$

Число нейтрино, прошедших через слой вещества толщиной x (нейтрино в нем замедляются),

$$N(x) = N(0)\exp(-n\sigma x)$$

Где n – количество ядер вещества в единице объема.

L – длина, на которой поток антинейтрино уменьшается в e раз, то есть $L=1/n\sigma$

$n = {\rho N_A}/{A}$, N_A – число Авогадро, ρ – плотность вещества, A – молярная масса.

Для воды $\rho = 1\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, $A(H_2O) = 18$

$L = \frac{1}{n\sigma} = \frac{A}{\rho N_A \sigma} = \frac{18}{1\text{г/см}^3 \times 6\cdot 10^{23} \times 10^{-43}\text{см}^2} = 3\cdot 10^{20}\text{см} = 3\cdot 10^{15}$ км - длина свободного пробега, чтобы замедлилось в e раз.

$$t = \frac{L}{c} = \frac{3\cdot 10^{15}\text{км}}{3\cdot 10^5\ \text{км/с}} = 10^{10}\text{с} \approx 320\ \text{лет}$$

(1 год $\approx 3{,}156\cdot 10^7$ с)

Нейтрино 320 лет ходит по воде и раз в 320 лет подает сигнал.

Тождественны ли ν_e и $\widetilde{\nu_e}$?

Нейтрино и антинейтрино – это одинаковые частицы или нет? До сих пор идет дискуссия. Если они тождественны, то должна наблюдаться реакция:

$\widetilde{\nu_e} + n \to p + e^-$ (*)

Это следует из того, что наблюдается реакция:

$$\widetilde{\nu_e} + p \to n + e^-$$
$$\nu_e + n \to p + e^- \quad (**)$$

Тогда возможна реакция (антинейтрино, взаимодействуя с нейтроном, один из нейтронов хлора превращает в протон, хлор превращается в аргон):

$$\bar{\nu}_e + {}^{37}_{17}\text{Cl} \to {}^{37}_{18}\text{Ar} + e^-$$

Этот аргон радиоактивный, пытаемся его зарегистрировать, мы берем детектор, в котором 4 тыс литров хлора, облучаем потоком нейтрино от реактора, ожидая, что будет что-то с сечением 10^{-43}см^2. Сто раз увеличиваю время, ни одного случая нейтрино не обнаруживаю. Следовательно, нейтрино и антинейтрино – разные частицы.

Спиральность

Для нейтрино и для любой частицы, которая движется со скоростью света, введем понятие спиральности. Мы знаем, что частица имеет спин.

$$h = \frac{\vec{S}\cdot\vec{p}}{|\vec{S}|\cdot|\vec{p}|}$$

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Когда она движется в пространстве, спин может быть направлен в сторону движения и в противоположную сторону (Рисунок 64). Если спин направлен в сторону движения, то спиральность положительная, если в противоположную сторону – отрицательная.

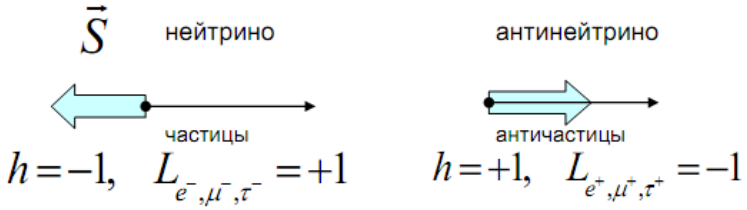


Рисунок 64. Спиральность

Первое отличие в том, что спиральность нейтрино всегда отрицательна ($h_\nu = -1$), а спиральность антинейтрино всегда положительна ($h_{\bar{\nu}}=+1$). Понятие спиральности хорошо только для частиц, двигающихся со скоростью света.

Мюон

После того, как открыли электрон, Юкава придумал следующее, что есть пи-мезоны, которые связывают за счет обмена протоны и нейтроны (обмен пи-мезоном: есть протон, который испускает положительно заряженный пи-мезон, становится нейтроном, нейтрон поглотил положительно заряженный пи-мезон и превратился в протон). Появилась частица, которая имеет массу, как предсказал Юкава (чуть меньше 140 МэВ). Открыли пи-мезон, квант ядерного поля. Начали смотреть, как она взаимодействует с теми же самыми частицами, что находятся в камере Вильсона – не те сечения совсем. Тогда оказалось, что открыли другую частицу, не пи-мезон, а мюон. Мюон – это частица, которая имеет характеристики (Рисунок 65):

1937 г. Открытие мюона

Характеристика	Численное значение
Спин J	1/2
Масса $m_\mu c^2$, МэВ	105.6583692±0.0000094
Электрический заряд	Равен заряду электрона
Магнитный момент, $e\hbar/2m_\mu c$	1.0011659203±0.0000000007
Время жизни, сек	$(2.19703\pm0.00004)\cdot10^{-6}$
Лептонное число L_μ	+1
Лептонные числа L_e, L_τ	0

$$\mu^- \to e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu, \quad \mu^+ \to e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

μ^- и μ^+ соответственно частица и античастица

Рисунок 65. Характеристики мюона

Мюон частица нестабильная, она распадается за время $2{,}2 \cdot 10^{-6}$с. Распад мюона показан на **Рисунок 65**. Появилась новая частица со своим антинейтрино.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Берем пучок протонов, бьем по бериллиевой мишени, рождаются пи-мезоны, которые распадаются:

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$$
$$\pi^- \to \mu^- + \widetilde{\nu_\mu}$$

Нейтрино мюонное или электронное? Пока пишем нейтрино мюонное. Дальше ставим колоссальную защиту, несколько десятков метров свинца. Все частицы, которые родились и летят в этом направлении, поглощаются. А нейтрино мюонные проходят эту защиту, и надо их увидеть. Для этого берем листы железа, 2× 2 м, 10 листов, между ними создаем промежутки 1 см, заполняем их воздухом, дальше ставим сцинтилляционные детекторы, дальше ставим стопку из искровых камер. Смотрим, что происходит. Если появляется нейтрино, то взаимодействуя с протоном и нейтроном, оно должно рождать мюоны. Если летит нейтрино мюонное, оно рождает либо электрон, либо мюон. Если это нейтрино электронное и мюонное одинаковые, то оно может рождать электроны, либо мюоны. Как только прилетает заряженная частица, подаем высокое напряжение, пробой, смотрим, как идет искра и изучаем ее свойства. При взаимодействии нейтрино мюонных ни одного случая рождения электрона не было, рождаются только мюоны. Но примерно в 1 эксперименте из 500 случаев такой реакции рождались положительно и отрицательно заряженные мюоны, и ни в одном случае отрицательно заряженный электрон не был обнаружен.

$$\widetilde{\nu_\mu} + p \to \mu^+ + n$$
$$\nu_\mu + n \to \mu^- + p$$

Эти реакции не идут:

$$\widetilde{\nu_\mu} + p \not\to e^+ + n$$
$$\nu_\mu + n \not\to e^- + p$$

Таким образом видим, что нейтрино мюонное – это не нейтрино электронное. Это разные частицы. Первое семейство – электрон, нейтрино электронное, второе семейство – отрицательно заряженный мюон и его нейтрино.

Тау-лептон.

Дальше пытаются открыть новые кварки, и обнаруживают интересное явление.

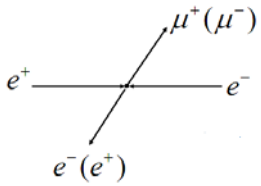


Рисунок 66. Столкновение электрона и позитрона.

Когда сталкивают электрон и позитрон (**Рисунок 66**), они исчезают, рождается фотон, который дальше распадается на пару: электрон и позитрон, мюон и электрон (положительно заряженная и отрицательно заряженная частица), мюон отрицательный

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

и положительно заряженный электрон. То есть сталкиваем электрон с позитроном и видим, что из точки взаимодействия вылетает положительно заряженный мюон и отрицательно заряженный электрон, отрицательно заряженный мюон, положительно заряженный электрон. Вылетает μe пара, но с разным зарядом. Когда электрон сталкивается с позитроном (**Рисунок 67**), рождается новая частица – тау-лептон,

$$e^+ + e^- \to \begin{cases} \tau^- \to e^- \overline{\nu}_e \nu_\tau \quad \text{или} \quad \mu^- \overline{\nu}_\mu \nu_\tau \\ \tau^+ \to e^+ \nu_e \overline{\nu}_\tau \quad \text{или} \quad \mu^+ \nu_\mu \overline{\nu}_\tau \end{cases}$$

Рисунок 67. Рождение частиц при столкновении электрона и позитрона

которая имеет время жизни 10^{-13}с, поэтому он распадается на электрон, антинейтрино электронное и рождает третий тип нейтрино (и антинейтрино). Если происходят такие распады, то сюда полетел τ^+, сюда τ^-. Видим, что τ^- распадается (Рисунок 68), превращается в ν_τ, W бозон превращает тау-лептон в нейтрино лептонное, родился и распался на электрон и антинейтрино электронное, на электрон и антинейтрино мюонное, на d кварк и $\bar{u}$ кварк.

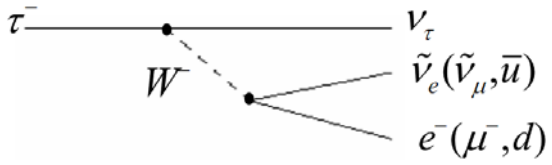


Рисунок 68. Распад отрицательного тау-нейтрино

Посмотрим на характеристики тау-лептона (Рисунок 69).

τ-лептон

Характеристика	Численное значение
Спин J	1/2
Масса $m_\tau c^2$, МэВ	1776.99±0.28
Электрический заряд	Равен заряду электрона
Магнитный момент, $e\hbar/2m_\tau c$	1±0.06
Время жизни, сек	$(2.906\pm0.011)\cdot10^{-13}$
Лептонное число L_τ	+1
Лептонные числа L_e, L_μ	0

Рисунок 69. Характеристики тау-лептона

Имеем три семейства частиц (Рисунок 70): каждому распаду соответствует своя вероятность распада.

$$\tau^- \to e^- + \overline{\nu}_e + \nu_\tau \qquad 17.84\%$$
$$\tau^- \to \mu^- + \overline{\nu}_\mu + \nu_\tau \qquad 17.36\%$$
$$\tau^- \to адроны + \nu_\tau \qquad 63\%$$

Рисунок 70. Семейства частиц

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Между первым и вторым типом распада различие небольшое, потому что тау-лептон высоко, 1777 МэВ, электрон – 0,5 МэВ, мюон – 106 МэВ, и тау-лептону все равно, в какую сторону распадаться. Мюон и лептон – абсолютно одинаковые частицы, которые различаются только массой, а по отношению к электромагнитному и слабому взаимодействию они ведут себя одинаково.

τ – нейтрино.

Дальше было открыто τ – нейтрино. Сложность открытия связана с тем, что такие события происходят редко. Мы берем детектор DONUT (прямое наблюдение ню тау), пучок протонов. Здесь рождаются ν_τ, здесь ставим магнит, стальную защиту, все поглощается, летят только нейтрино, дальше ставим детектор, чтобы их увидеть. Между стальными пластинками помещаем эмульсии. Как только ν_τ, влетает, оно рождает тау-лептон, и на фотопластинке видим следы от тау-лептона.

Мы знаем, что есть электрический заряд. Электрон имеет отрицательный заряд, протон – положительный. Закон сохранения электрического заряда. Оказывается, что лептонам можно приписать лептонные заряды, или лептонные квантовые числа (Рисунок 71).

Лептонные числа

	L_e	L_μ	L_τ		L_e	L_μ	L_τ		L_e	L_μ	L_τ
e^-	+1	0	0	μ^-	0	+1	0	τ^-	0	0	+1
ν_e	+1	0	0	ν_μ	0	+1	0	ν_τ	0	0	+1
e^+	−1	0	0	μ^+	0	−1	0	τ^+	0	0	−1
$\tilde{\nu}_e$	−1	0	0	$\tilde{\nu}_\mu$	0	−1	0	$\tilde{\nu}_\tau$	0	0	−1

Рисунок 71. Лептонные числа

Почему электрон и позитрон являются стабильными частицами? Потому, что это самые легкие частицы, которые имеют отрицательный и положительный заряд. Никому они свой заряд отдать не могут.

Почему протон является стабильной частицей? Потому, что у него есть еще и барионный заряд. Если бы его не было, то протон распался бы на π^+ – мезон, заряд сохранился, и гамма-квант. Но так не происходит потому, что есть барионный заряд. Лептонные заряды являются сохраняющимися величинами, обладают аддитивными свойствами, то есть заряд системы лептонов равняется сумме лептонных зарядов отдельно, и они должны быть одинаковыми в начале и конце процесса.

Закон сохранения лептонных зарядов: в процессах, происходящих в замкнутой системе в результате сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий, каждое лептонное число L_e, L_μ, L_τ сохраняются порознь.

Рассмотрим пример (Рисунок 71)

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Рисунок 71. Применение закона сохранения лептонного заряда

Законы сохранения приводят к тому, что какие-то процессы могут наблюдаться, а какие-то не наблюдаются.

Лептонные числа L_e, L_μ, L_τ

Во всех процессах происходящих в замкнутой системе в результате сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий лептонные числа L_e, L_μ, L_τ сохраняются порознь. Поэтому

наблюдаются процессы

$$\tilde{\nu}_\mu + p \to \mu^+ + n$$
$$\nu_\mu + n \to \mu^- + p$$
$$\pi^- \to \mu^- + \tilde{\nu}_\mu$$
$$\mu^- \to e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu$$
$$\tau^- \to e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\tau$$
$$\tau^- \to \mu^- + \tilde{\nu}_\mu + \nu_\tau$$

не наблюдаются процессы

$$\mu^- \to e^- + \gamma$$
$$\nu_\mu + p \to \mu^+ + n$$
$$\nu_\mu + n \to e^- + p$$

$$w(\mu^- \to e^- + \gamma)/w(\mu^- \to e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu) < 10^{-11},$$
$$w(\mu^- \to e^- + e^- + e^+ \gamma)/w(\mu^- \to e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu) < 10^{-12},$$
$$w(\tau^- \to e^- + \gamma)/w(\tau^- \to \text{все моды распада}) < 3 \cdot 10^{-6},$$
$$w(\tau^- \to \mu^- + \gamma)/w(\tau^- \to \text{все моды распада}) < 10^{-6}.$$

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Лекция 6. Кварки. Адроны.

Фундаментальные частицы Стандартной модели.

Стандартная модель – это модель, которая позволяет описать все, что происходит во Вселенной. Она исходит из того, что существуют 3 поколения фундаментальных частиц (Рисунок 72). Иногда говорят - частицы первого семейства, второго и третьего.

Рисунок 72. Фундаментальные частицы Стандартной модели

Они отличаются тем, что первое семейство работает при тех энергиях, при которых мы живем. Если повышать температуру или энергию, то вступает второе и третье семейства.

Недавно открыли частицу – бозон Хиггса, которая позволила объяснить, откуда берутся массы частиц. Оказывается, если все убрать, получится физический вакуум, это не пустота. В физическом вакууме постоянно рождаются частицы, они с ним взаимодействуют, в вакууме находится поле Хиггса, частица, которая соответствует кванту этого поля – бозон Хиггса. Когда частица взаимодействует с бозоном Хиггса, она приобретает массу.

Поле Хиггса можно представить себе так: есть бассейн. Представим себе вакуум, мы спокойно перемещаемся, какая-то сила действует, мы двигаемся с каким-то ускорением. Представьте, что пространство заполнено водой. При той же самой силе я буду двигаться медленно, потому что у меня увеличилась масса. Вода дала мне эквивалентную массу. Это поле Хиггса, которое всюду разлито, дает такое ощущение: появление массы. Есть тонкость: не вся масса обусловлена бозоном Хиггса, есть масса, связанная с собственной массой взаимодействующих частиц.

Чтобы провести разделение между частицами, мы изучали разные процессы, которые происходят с этими частицами, и чтобы описать эти процессы, существуют квантовые числа, новы квантовые числа, которые в повседневной жизни мы не видим. Это лептонные квантовые числа. Есть лептонное квантовое число $L_e = +1$, $L_\mu = +1$,

$L_\mu = +1$. Античастицы имеют квантовое число, равное (-1). Поэтому простой процесс: распад мюона. Масса у него большая, 105,7 МэВ, он, распадаясь, должен кому-то предать свой электрический заряд. Кому он может это сделать? Только электрону. При распаде мюона появляется электрон. С его появлением лептонное число меняется, потому что появился $L_e = +1$, нужно его скомпенсировать за счет частицы, имеющей электрический заряд, равный нулю, и лептонное число, равное (-1). Это антинейтрино. Слева стоит мюон, который распадается, слева $L_\mu = +1$, с другой стороны, тоже должна быть частица, у которой $L = +1$. Какая это частица? Это нейтрино мюонное.

Может, есть процессы, которые не соответствуют этому распаду? Ищем такой распад: мюон распался на электрон и гамма-квант. Имеем несохранение лептонного заряда. На сегодняшний день такой процесс не найден. Есть закон сохранения импульса, количества движения. Он связан с тем, что пространство однородное. Закон сохранения количества движения: куда бы я ни повернулся, все будет одинаково, как бы ни установил свою установку, результаты будут одинаковыми. Это связано с тем, что пространство однородное и изотропное. Нет аналога, какие свойства пространства и времени отвечают за сохранение лептонного числа. Этот факт, который пока связать с законом сохранения или свойствами пространства мы не можем.

Кварки

Кварки были придуманы в 1963 году. Приведем 2 картинки, на которых видно, как рождаются элементарные частицы. К 1963 году число элементарных частиц стало большим, около 40. Стало понятно, что такое количество элементарных частиц быть не может. Откуда взялись эти частицы, как мы их наблюдаем?

Глезер изобрел пузырьковую камеру. Есть сосуд с перегретой жидкостью, которая, если попадает частица, начинает закипать вдоль траектории частицы, появляются пузырьки. Если быстро сфотографировать, то можно видеть, как в объеме летят заряженные частицы. Это был выдающийся результат, потому что позволил впервые глазом увидеть событие, которое разыгрывается в микромире.

Рассмотрим примеры. K^-мезон взаимодействует с протоном, вылетает Ω^- - частица, K^0,K^+-мезоны. Как происходит взаимодействие, видим на диаграмме (Рисунок 73).

K^0 – нейтральная частица, мы ее не видим, можем только гадать, как она двигается. Ω^-- частица распалась на нейтральную частицу (каскадный гиперон) и π^-мезон, который мы видим. Летит гамма-квант, он рождает электрон-позитронную пару (они разлетаются в разные стороны). Λ^0 частица распадается на протон и π^-мезон, гамма-квант опять рождает электрон-позитронную пару, в магнитном поле все это закручивается. Эта пузырьковая камера помещена в магнитное поле. Пузырьковая камера – это цилиндр диаметром 2 метра и длину 3 метра, заполненный жидким водородом (это протоны), поэтому частица, когда влетает в камеру, взаимодействует и оставляет следы.

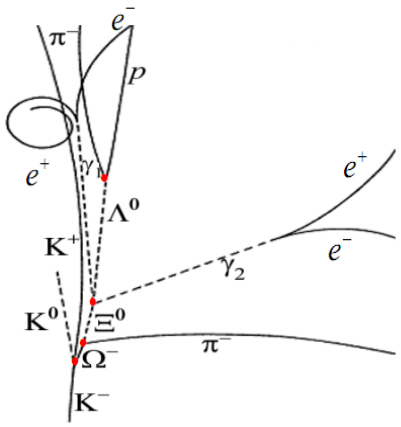
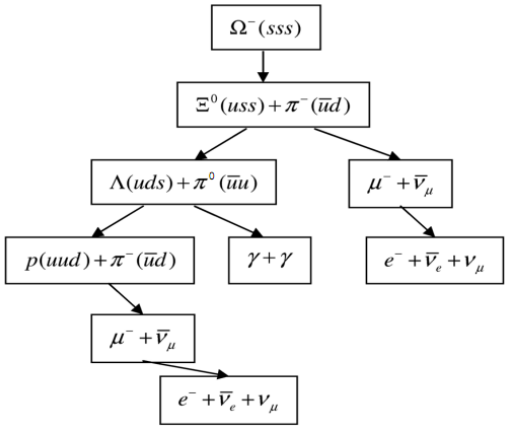


Рисунок 73. Взаимодействие К-мезона с протоном

Как распадаются частицы, можно посмотреть на схеме (Рисунок 74). По мере того, как происходит распад, массы частиц меняются.



$M(\Omega) = 1672{,}5$ МэВ
$M(\Xi^0) = 1314{,}9$ МэВ
$M(\Lambda) = 1115{,}6$ МэВ
$M(p) = 938{,}3$ МэВ
$M(\mu^-, \mu^+) = 105{,}7$ МэВ
$M(\pi^+, \pi^-) = 139{,}6$ МэВ

Рисунок 74. Схема распада частиц

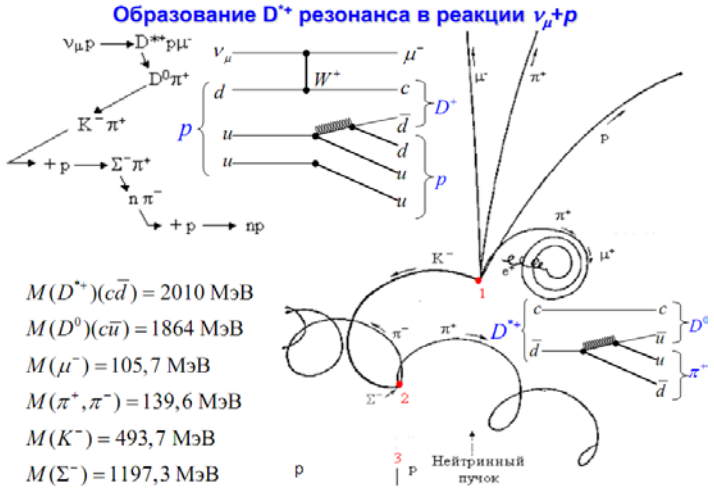


Рисунок 75. Образование резонанса в реакции.

Мюонное нейтрино падает на протон, получается резонансная частица D^{**}, p, μ^-. Дальше D^{**} частица распадается по каналу: пучок нейтрино (родилась резонансная частица, которая начала распадаться, и нейтринный пучок – это ее история). Летел K^-мезон, он встретил второй протон, пошла другая реакция. Здесь образовался π^+мезон, распался на моюн и нейтрино, но нейтрино – нейтральная частица, мюон закручивается в магнитном поле, (в данном случае μ^+) он распался на позитрон и нейтрино и антинейтрино. Электрон заключен в магнитном.

Глядя на такие события, измеряя импульсы частиц, измеряя ионизацию, которую они создают вдоль траектории, говорим, что это такая-то частица с такой массой и т.д. Так открывают элементарные частицы.

Адроны

Частицы, которые участвуют в сильном взаимодействии, называются адроны (Рисунок 76). От слова hard – сильный, твердый. Это нейтрон, протон, Λ -частица, три сигма-гиперона, два каскадных гиперона. Нейтрон и протон примерно одинаковую массу имеют, потом большой промежуток, три частицы имеют близкие массы, потом снова промежуток, и снова 2 частицы имеют близкую массу. Это наводит на мысль, что эти частицы не являются элементарными, внутри этих частиц есть что-то, что и есть элементарные частицы. Это кварки. Аналогичная ситуация с тремя пи-мезонами (массы примерно одинаковые) и двумя К-мезонами.

В глаза бросается то, что имеется 2 заряженные частицы (+ и -), участвующие в сильном взаимодействии, а массы у них одинаковые, они не зависят от заряда. На самом деле свойства частиц определяются не электрическим зарядом, а чем-то более глубоким.

Адроны — элементарные частицы?

n	(939.6 *МэВ*)	π^+	(139 *МэВ*)
p	(938.3 *МэВ*)	π^-	(139 *МэВ*)
Λ	(1116 *МэВ*)	π^0	(134 *МэВ*)
Σ^+	(1189 *МэВ*)	K^+	(494 *МэВ*)
Σ^-	(1197 *МэВ*)	K^-	(494 *МэВ*)
Σ^0	(1193 *МэВ*)		
Ξ^0	(1315 *МэВ*)		
Ξ^-	(1321 *МэВ*)		

Рисунок 76. Адроны

Кварки.

Глядя на это, Гелл-Манн и Цвейг в 1963 году сказали, что частицы, которые открыты на сегодняшний день, это не элементарные частицы, они состоят из фундаментальных частиц, которые они назвали кварками. Гелл-Манн назвал их кварками. Имея три кварка u – up, d-down, s, описывали все элементарные частицы, которые были известны на тот момент. Какие электрические заряды имеют кварки?

Протон – заряженная частица, значит, кварки должны иметь заряд. Решая систему уравнений, они описали протон, нейтрон, сказали, что кварки имеют дробный заряд, $2/3, 1/3, -(2/3), -(1/3)$ и так далее. Кварки в свободном состоянии не появляются. Наблюдались только связанные состояния кварков в адронах.

Кварковая структура адронов.

Посмотрим, какими свойствами обладают кварки в адронах.

Кварковая структура адронов

$p \quad (uud)$
$n \quad (udd)$
$\Lambda \quad (uds)$
$\Xi^0 \quad (uss)$
$\Xi^- \quad (dss)$

$$Q(u) = +\frac{2}{3}e$$

$$Q(d,s) = -\frac{1}{3}e$$

Кварки должны иметь дробный электрический заряд

$\pi^+ \quad (u\bar{d})$ $\quad K^+ \quad (u\bar{s})$
$\pi^- \quad (\bar{u}d)$ $\quad K^- \quad (\bar{u}s)$

Кварки имеют спин

$$J(q) = 1/2$$

Например, протон. Протон стоит из двух u-кварков и одного d-кварка. Заряд $Q(u) = +\frac{2}{3}e$, заряд $Q(d) = -\frac{1}{3}e$. Электрический заряд протона $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$.

Нейтрон: (udd): $\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$.

Λ-частица состоит из (uds): $Q(s) = -\frac{1}{3}e$. Подставляем: $\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$.

Частицы можно разделить на 2 группы: барионы и мезоны. Барионы состоят из трех кварков, антибарионы состоят их трех антикварков, а мезоны состоят из кварков и антикварков.

π-мезон состоит из $(u\bar{d})$. Заряд: $\frac{2}{3} + \frac{1}{3} = 1$. (Заряд $Q(\bar{u}) = \frac{1}{3}$).

Спин кварков равен половине.

Если имеются две точечные частицы со спином половинка, то сечение образования фермионов в реакции однофотонной аннигиляции (Рисунок 77),

e^+e^- аннигиляция

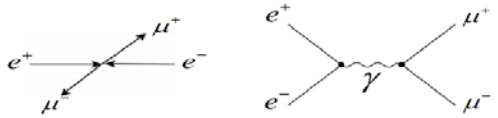


Рисунок 77. Электрон-позитронная аннигиляция

т.е. имеется два фермиона, они аннигилировали, родился фотон и дальше родился μ^+, μ^-, будет определяться следующей формулой: $\sigma \approx \frac{4\pi\alpha^2}{3s} Q_f^2 = \frac{86.8 \cdot Q_f^2 \text{ нбарн}}{s(\text{ГэВ}^2)}$

$$s = (E_{e^-} + E_{e^+})^2$$

Q — это заряды частиц в единицах заряда протона, S – энергия частиц.

Открывают кварки. Адронные струи.

Сталкиваем электрон и позитрон, получается гамма-квант (Рисунок 78). Гамма-квант может распасться на μ^+, μ^- и может распасться на кварк и антикварк $q, \bar{q}$.

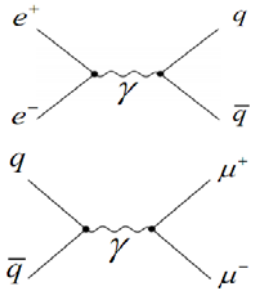


Рисунок 78. Распад γ - кванта после взаимодействия электрона с позитроном

Если бы процесс был такой, что в результате такого столкновения рождаются просто адроны, то имели бы следующее: электрон и позитрон столкнулись, во все стороны посыпались бы адроны. Но ситуация выглядит не так: столкнулись, образовались кварк и антикварк, и из этой точки полетели две струи адронов, т.е. они рассыпались на 2 струи (Рисунок 79).

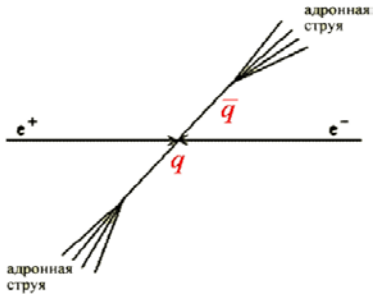


Рисунок 79. Адронные струи

Это происходит таким образом. Одна струя адронов образовалась из взаимодействия одного кварка с вакуумом, образовались эти частицы, так же для второго кварка. Кварки должны оставить след образованием адронных струй. Теперь изучая адронные струи, и пытаемся понять, что из себя представляют кварки.

Было известно семейство лептонов, а тут ситуация: u кварк, d кварк, s кварк. Нет никакой симметрии.

Начали искать еще один кварк, чтобы была симметрия. Брали протон, били по бериллию, в результате появлялись электрон и позитрон плюс какие-то остальные частицы.

$$p + Be \rightarrow e^- + e^+ + \text{остальные частицы}$$

Меняем энергию протонов, смотрим спектр электронов и позитронов (Рисунок 80) и обнаруживаем, что спектр имеем максимум при энергии примерно 3 ГэВ.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

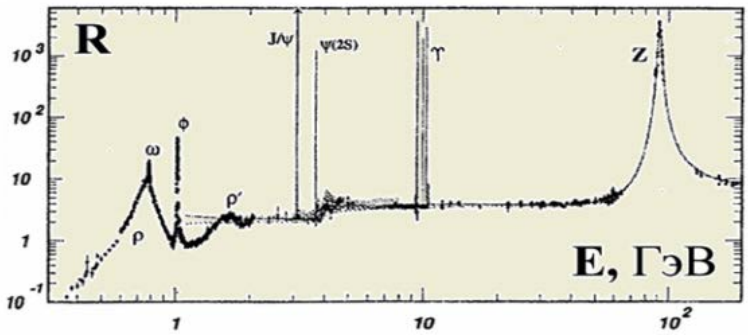


Рисунок 80. Спектр электрона и позитрона в эксперименте.

Резонанс в спектре $e^- e^+$ был назван J-частицей.
Вторая группа физиков брала электрон и позитрон, сталкивала их и смотрела при какой энергии сечение будет максимально.

$$e^+ + e^- \rightarrow \text{адроны}$$
$$e^+ + e^- \rightarrow e^+ + e^-$$
$$e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$$

Обнаружила, что при энергии 3,1 ГэВ наблюдается резонанс. Резонанс был назван ψ-частицей.

Частицу назвали J/ψ-частицей. Эта частица обладает замечательным свойством: частицы в этой области быстро распадаются, а она не хотела распадаться. Ширина резонанса 91 кэВ, очень узкий резонанс, время жизни большое. Потому, что эта частица состоит из кварков нового типа, с-кварков, а они распадаются в результате слабого взаимодействия. Был открыт с-кварк. Потом стали увеличивать энергии в эксперименте, дошли до еще одного резонанса, он тоже плохо распадался, назвали его очередным кварком. Пятый кварк – b-кварк. Опять никакой симметрии.

В состав ипсилон-мезона входят b-кварк и $\bar{b}$-антикварк, поэтому они обладают скрытой красотой (b-это beauty).

T-кварк.

Начались попытки обнарудить t-кварк.

Q = +2/3	***u***	***c***	
Q = –1/3	***d***	***s***	***b***

Рисунок 81. Кварки

Если исходить из симметрии, то кварки (Рисунок 81) в первой строчке имеют заряд (+2/3), а кварки второй строчки – (-1/3). Если есть t-кварк, то он должен иметь заряд (+2/3).

Как искать? Возьмем протон (Рисунок 82), столкнем с антипротоном.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

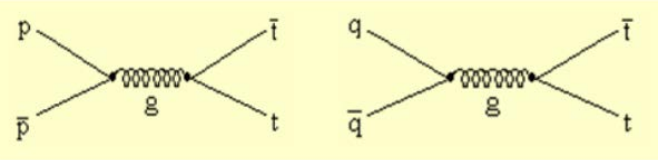


Рисунок 82. Поиск t-кварка

Это столкновение приведет к рождению кванта сильного поля – глюона. Есть надежда, что он распадется на t и $\bar{t}$ кварки. А на кварковом уровне, когда протон с антипротоном, u кварк протона сталкивает с $\bar{u}$ кварком антипротона, b кварк протона сталкивается с $\bar{b}$ кварком антипротона.

Начали искать. На $10^9 - 10^{10}$ событий – одно событие (обнаружение кварка). Кварки рождают струи, надо изучать их. В 1995 году на теватроне в Фермилабе проанализированы картинки и показано, что кварк существует.

Он существует очень короткое время - 10^{-25}с. За это время не успевает создать адрон, распадается, мы видим продукты распада.

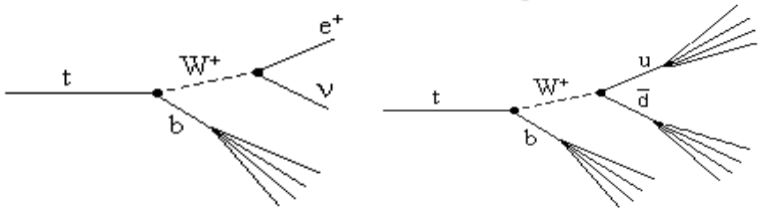


Рисунок 83. Распад t-кварка

t-кварк распадается на b-кварк, который порождает адронную струю. Это процесс слабого распада, обязательно должен быть W-бозон, который может распасться на позитрон и нейтрино электронное, либо на u'кварк и $\bar{d}$ кварк, и тогда мы будем наблюдать струи. При распаде t-кваркадолжны образовываться либо 2 лептона и одна адронная струя, било 3 адронные струи, выхванные кварками. Сталкиваем и изучем, что получается. Увидели картинку (Рисунок 84): столкновение протона с антипротоном, образование t и $\bar{t}$ -кварка.

t распадается на b и W^+, $\bar{t}$ распадается на $\bar{b}$ и W^-, и даны распады для W^+и W^-. И струи, о которых мы говорили, 4 струи. Все это было проанализировано, 6-ой кварк был открыт. Физика стала симметричной: имеем при поколения кварков, три поколения лептонов, можем все описать.

Барионный заряд.

Лежит частица, масса ее 0,511 Мэв, спин половинка, заряд положительный. Это позитрон. Лежит частица, сама 940 Мэв, спин половинка, заряд ноль . Что это? Антинейтрон. Как отличить? В квантовом мире частицы имеют дополнительные квантовые числа, о которых мы еще не говорили. Казалось бы, нейтрон и антинейтрон различить нельзя. Но это не так. Посмотрим на свойства t-кварка (Рисунок 85).

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Пример

Один из случаев распада $t\bar{t}$ -кварков, образовавшихся в реакции:

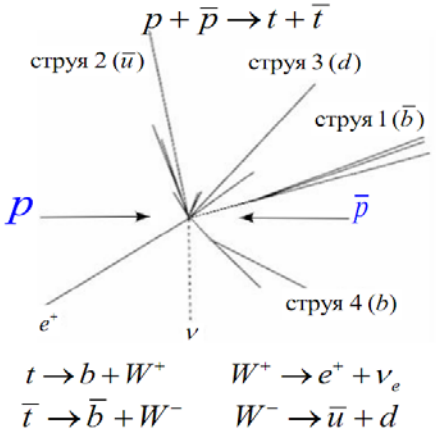


Рисунок 84. Пример распада кварков

t-кварк

Масса, mc^2	**171.2±2.1 ГэВ**
Электрический заряд, e	**+2/3**
Барионное число B	**+1/3**
Спин	**+1/2**
Квантовое число t	**+1**
Изоспин и квантовые числа s, c, b	**0**

Рисунок 85. Свойства t-кварка

У него появляется новое квантовое число – барионный заряд.
Почему t-кварк так быстро распадается? Потому, что колоссальную массу, а в слабых распадах вероятность распада, или период полураспада, или среднее время жизни, $\tau = Q^{-5}$. Чем больше энергия, тем меньше время жизни. Он паспадается за 10^{-25}с, не успевая прицепить к себе никаке другие кварки, поэтому адрон не образует. Все остальные кварки образуют адроны, а это мгновенно распадается.

Сегодня имеется 6 кварков: up, down, charm, strange, top, bottom, и есть серьезные основания считать, что число кварков не должно быть больше шести. Кварки являются фундаментальными частицами, из которых состоят все сильно-взаимодействующие частицы. Кварки не существуют в сободном состоянии, они спрятаны в адронах.

Конфайнмент.

Появляется новое слово: силы, связывающие кварки в адронах, растут с увеличением расстояния между кварками. Это называется удержание кварков в адронах или конфайнментом.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Есть положительный и отрицательный заряд, они взаимодействуют. На какое-то расстоянии я их разношу. Сила взаимодействия между ними уменьшается. Чем дальше мы ее тянем, тем большую силу надо приложить. Берем адрон, пытаюсь из него вырвать кварк, кварк вылетает, одевается струей и летит в виде адрона или нескольких адронов. Кварки спрятаны внутри адрона, когда они находятся на близком расстоянии, у них взаимодействие слабое, а как только начинаем тянуть, взаимодействие между ними увеличивается.

Квантовые числа кварков.

Кварки — это фермионы, они имеют спин половинку. Спин антикварка тоже половина.

$$J(q) = \frac{1}{2}$$

$$J(\bar{q}) = \frac{1}{2}$$

Четность.

$$P(q) = +1$$

$$P(\bar{q}) = -1$$

Это симметрия волновой функции относительно операции зеркально отражения. Весь вопрос в том, как преобразуется волновая функция. Оператор отражения в зеркале действует на r (изменил направление на противоположное):

$$P\psi(r) \rightarrow \psi(-r)$$

Отсюда выстраивается все здание сильно взаимодействующих частиц.

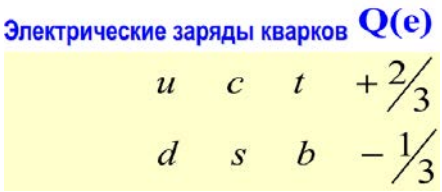


Рисунок 86. Электрические заряды кварков

Антикварки имеют противоположный знак заряда.

Определение заряда кварков.

Как залезть внутрь адрона? Как определить заряд кварка? Не надо лезть внутрь адрона.

Берем протон (Рисунок 87). Он состоит из трех кварков: uud, бьют по нему протонным нейтрино. В связи с тем, что энергия большая, бьем по d-кварку, он рождает струю, которая пошла вниз, d-кварк получил энергию, он не может вылететь в виде d-кварка, он одевается струей, поэтому летит струя вперед. Два u-кварка тоже не могут быть видимы, они образуют струю, подхватывают еще кварки, чтобы получилась другая струя адронов. Как отличить струи? Одна летит вперед, другая – назад. Если возьмем на совпадение мюон, буду фиксировать события, где я вижу мюон и струю адронов, то делаю следующее: каждая струя имеет какой-то целочисленный зарад, потому что она состоит из адронов (адроны имеют заряд либо 1, дибо (-1), либо 0,

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

целое число). Но если взять большое число струй, просумировать заряды и поделить на число струй, то получим, что если образую u-кварк из d-кварка при взаимодействии с W-бозоном, то суммарный заряд u-кварка по большому числу струй, будет 0,65. Это 2/3. Таким образом, измеряя по большому числу струй усредненный заряд, получаем заряд кварка, который образовал струю.

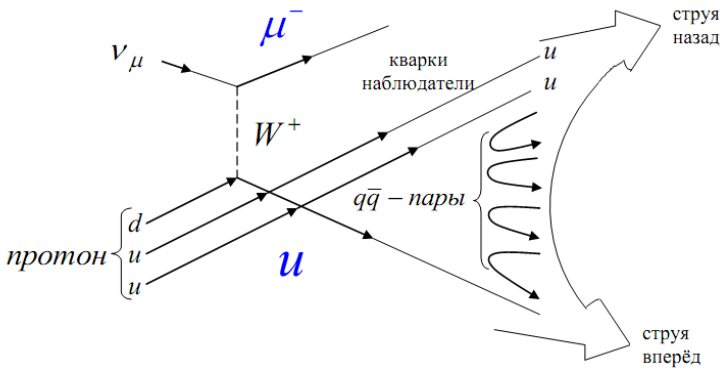


Рисунок 87. Электрический заряд u кварков

Теперь могу поступит аналогичным образом (Рисунок 88).

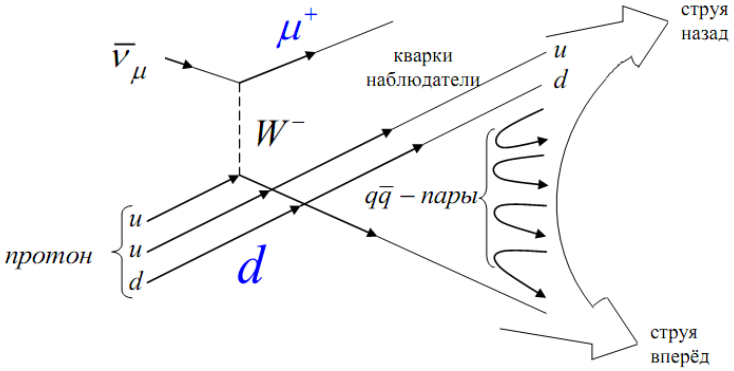


Рисунок 88. Электрический заряд d кварка

Взять протон и другой пучок - антинейтрино мюонное, оно рождает W-бозон, который взаимодействует с u-кварком, он превращает u-кварк в d-кварк, он полетел струей вперед. Берем эту струю на совпадение с μ^+, получаем, что заряд d-кварка равен 0,33, а это 1/3.

Изучая распределение струй, средние заряды струй, получаем заряды кварков. Но предварительно надо понимать, какие процессы происходят: что нейтрино меняет тип кварка.

Барионный заряд.

Барионный заряд кварка $B(q) = +{}^1/_3$

Барионный заряд антикварка $B(\bar{q}) = -{}^1/_3$

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Есть заряд протона и электрона. Надо договориться, что такое положительный и отрицательный заряд. Отрицательный заряд - это заряд, который несет электрон, тогда автоматом протон получает положительный заряд. Они в разные стороны в магнитном поле поворачиваются. То же самое с кварками. Приписываем кваркам барионный заряд 1/3, тогда автоматом у антикварка будет (-1/3).

Ароматы кварков.

Это новое квантовое число. Есть u,d,s,c, t,b, кварки. Каждый кварк имеет свое специфическое квантовое число: $s(s)=-1$, $c(c)=+1$, $b(b)=-1$, $t(t)=+1$
У антикварков – противоположный знак.

Изоспин.

Есть еще одно квантовое число – изоспин. Это наследие от спина – в обычном пространстве показывает, как направлен вектор момента количества движения. Изоспин – это в изоспиновом пространстве частицы могут иметь разное направление.

$$u \rightarrow \quad I = 1/2, \quad I_3 = +1/2$$
$$d \rightarrow \quad I = 1/2, \quad I_3 = -1/2$$
$$\bar{u} \rightarrow \quad I = 1/2, \quad I_3 = -1/2$$
$$\bar{d} \rightarrow \quad I = 1/2, \quad I_3 = +1/2$$

Рисунок 89. Изоспины u, d кварков

Знак «+» означает направление вверх, «-» - вниз. Изоспины s, c, b, t кварков равны нулю: I(s,c,b,t)= 0

Изоспиновые мультиплеты.

Мы говорим, что протон и нейтрон состоят из трех кварков. Попробуем построить протон: он состоит из uud кварков, спин I=1/2, $I_3 = +1/2$.
Для нейтрона: состоит из udd кварков, спин I= 1/2, $I_3 = -1/2$
Проекции изоспинов у них не совпадают. Аналогичная ситуация, если возьмем протон и антипротон, там будет -1/2. Отсюда видим, что протон и нейтрон – это два разных состояния одной частицы. Мы их объединяем одним словом – нуклон. Он может быть в виде протона, в виде нейтрона.

Изоспин – характеристика, которая характеризует сильные взаимодействия. Протон и нейтрон динаково взаимодействуют в сильном взаимодействии. Протон и нейтрон одинаково взаимодействуют в сильном взаимодействии. Если возьмем протоны и будем рассеивать на нейтронах, то взаимодействие между протонами и нейтронами будет точно такое же, как и между нейтроном и нейтроном (только надо вычесть кулоновское взаимодействие). Можем строить изоспиновые мультиплеты, то

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

есть частицы, которые имеют одинаковые значения изоспина и разные значения проекции изоспина. Если изоспин половинка, то частиц может быть 2, если изоспин 1, то частиц может быть 3. (n=2I+1)

Рассмотрим пример изоспинового триплета (Рисунок 89).

Изоспиновый триплет I=1

π^+ $(139.57\ МэВ)$ $I=1$ $I_3=+1$

π^0 $(134.98\ МэВ)$ $I=1$ $I_3=0$

π^- $(139.57\ МэВ)$ $I=1$ $I_3=-1$

π^+ $(u\bar{d})$ $I_3=+\frac{1}{2}+\frac{1}{2}=1$

π^0 $(u\bar{u}-d\bar{d})$ $I_3=+\frac{1}{2}-\frac{1}{2}=0$

π^- $(\bar{u}d)$ $I_3=-\frac{1}{2}-\frac{1}{2}=-1$

$I=1 \rightarrow$ $I_3=+1$ π^+; $I_3=0$ π^0; $I_3=-1$ π^-

Рисунок 89. Изоспиновые триплеты

Цвет.

После того, как мы сказали, что частицы состоят из кварков, нужно придумать правило, как из них строить частицы. Адроны строим из кварков. Адроны бывают барионы и мезоны. Барионы строим из трех кварков, мезоны – из двух (кварк-антикварк).

Рассмотрим частицы. Нарушен принцип Паули. Мы взяли три фермиона и посадили в одно квантовое состояние. Что делать? Боголюбов сказал, что кварки имеют еще одно квантовое число – цвет. Если трем кваркам дать новое квантовое число – цвет, то они станут разными. Один кварк – красный, второй - синий, третий – зеленый. Принцип Паули сохраняется, но появляется новое квантовое число – цвет. Вы берете 3 цвета в одинаковой пропорции, то получим белый цвет (либо прозрачный). Получим белую частицу, бесцветную. Нарисованы три s кварка, которые отличаются по цвету. Посмотрим более внимательно на картинку (Рисунок 90).

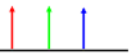
$\Omega^-(sss)$  $J^P=\frac{3^+}{2}$, $I=0$

Рисунок 90. Цветная частица

Учли цвет и сохранили принцип Паули. Вместо черно-белой картинки появилась прекрасная цветная картинка (Рисунок 91):

Рисунок 91. Цветные кварки

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Кварки имеют красный, синий, зеленый цвет, а антикварки имеют антикрасный, антисиний, антизеленый цвета.
Таким образом, имеем 18 цветных кварков (Рисунок 92):

$$u \to u_к, u_с, u_з \quad c \to c_к, c_с, c_з \quad t \to t_к, t_с, t_з$$
$$d \to d_к, d_с, d_з \quad s \to s_к, s_с, s_з \quad b \to b_к, b_с, b_з$$

Рисунок 92. Цветные кварки

И 18 цветных антикварков (Рисунок 93):

$$\bar{u} \to \bar{u}_{\bar{к}}, \bar{u}_{\bar{с}}, \bar{u}_{\bar{з}} \quad \bar{c} \to \bar{c}_{\bar{к}}, \bar{c}_{\bar{с}}, \bar{c}_{\bar{з}} \quad \bar{t} \to \bar{t}_{\bar{к}}, \bar{t}_{\bar{с}}, \bar{t}_{\bar{з}}$$
$$\bar{d} \to \bar{d}_{\bar{к}}, \bar{d}_{\bar{с}}, \bar{d}_{\bar{з}} \quad \bar{s} \to \bar{s}_{\bar{к}}, \bar{s}_{\bar{с}}, \bar{s}_{\bar{з}} \quad \bar{b} \to \bar{b}_{\bar{к}}, \bar{b}_{\bar{с}}, \bar{b}_{\bar{з}}$$

Рисунок 93. Цветные антикварки

Чтобы протон остался один, а не несколько, нужно сказать, как кварки между собой компонуются. Адрон есть цветная комбинация в равных пропорциях: $q_\alpha = \sum_{\beta=1}^{3} u_{\alpha\beta} q_\beta$, где $\alpha = 1, 2, 3$ – три цвета. Это порядок, как стоить кварки.

Адроны все бесцветные. Из цветных кварков строится бесцветный адрон. Цветной кварк сидит внутри адрона, он не хочет показывать свой цвет, а когда выскакивает, становится бесцветным. То есть он из вакуума добирает недостающие цвета и получается бесцветный адрон.

Чтобы барион подчинялся принципу Паули, нужно построит антисимметричную волновую функцию:$\psi_{\text{цвет}}(\text{барион}) = \frac{1}{\sqrt{6}}(\text{кзс} + \text{зск} + \text{скз} - \text{ксз} - \text{сзк} - \text{зкс})$

Переставляю цвета, получаю антисимметричную комбинацию.

Что можно поворачивать? Формулы. Поэтому, когда пишете гамильтониан, он должен обладать симметрией сильных взаимодействий, слабых, электромагнитных.

С мезоном просто: он имеет цвет-антицвет.

Как определить цвет? Вначале мы писали формулу сечения взаимодействия.

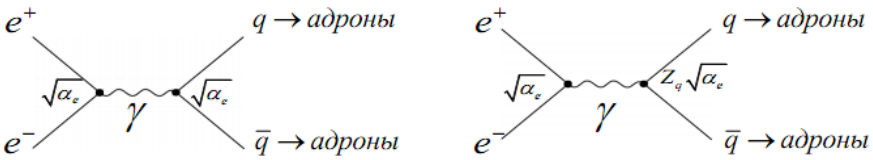


Рисунок 94. Сечение в реакции электрон-позитрон.

Есть e^+, e^-, гамма-квант превращается в мюоны и адроны (Рисунок 94). Нужно сравнивать эти 2 процесса, потому что S стоит в знаменателе: чем больше S, тем сильнее падет сечение. Чтобы от этого избавиться, делим сечение с образованием адронов на сечение с образованием мезонов:

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \to \text{адроны})}{\sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)}$$

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

То и другое – фермион, они должны подчиняться этой формуле $\frac{Q^2}{S}$:

Теория предсказывает $R = \sum Q_i^2$

Сколько будет этих Q? До тех пор, пока идем по энергиям до образования с-кварка, будут кварки u, d, s (энергия меньше, чем при которой образуется с-кварк). Суммируются заряды всех ароматов кварков, которые образуются при данной энергии.

$$E < c\bar{c}: \quad R_1 = \left(\tfrac{2}{3}\right)^2 + \left(\tfrac{1}{3}\right)^2 + \left(\tfrac{1}{3}\right)^2 = \tfrac{6}{9} = \tfrac{2}{3}$$

$$E < b\bar{b}: \quad R_2 = \left(\tfrac{2}{3}\right)^2 + \left(\tfrac{1}{3}\right)^2 + \left(\tfrac{1}{3}\right)^2 + \left(\tfrac{2}{3}\right)^2 = \tfrac{10}{9}$$

$$E < t\bar{t}: \quad R_3 = \left(\tfrac{2}{3}\right)^2 + \left(\tfrac{1}{3}\right)^2 + \left(\tfrac{1}{3}\right)^2 + \left(\tfrac{2}{3}\right)^2 + \left(\tfrac{1}{3}\right)^2 = \tfrac{11}{9}$$

Если у меня три кварка одного цвета, то отношение будет такое R_1, R_2, R_3 . Если три цвета, то нужно это увеличить в три раза, утроить, потому что не 3 кварка, а три цветных кварка (u-красный, u-зеленый, u- синий). Остается взять сечение, ортонормировать на мюонное сечение, получим следующую картинку (Рисунок 95):

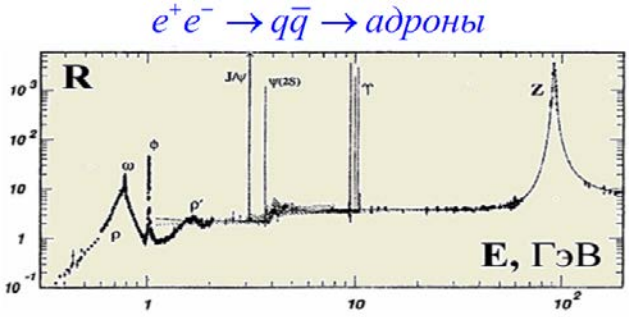


Рисунок 95. Зависимость сечения реакции от суммарной энергии электрона и протона

Видим три полочки. Это означает, что кварк не бесцветный, а имеет три цвета (соотношения, которые написаны, увеличиваем на 3).

Барионный заряд у всех 1/3, спин – у всех половинка, четность – у всех (+1). Почему? Потому что адрон состоит из трех кварков, 3 раза по (+1) – будет (+1). U и d кварки имеют спин половинка, остальные 0.

Кварк, когда сидит внутри адрона, и находится близко друг к другу, это называется токовый кварк. Это та масса, которую дает бозон Хиггса. Когда кварк находится внутри адрона, он обвешан глюонами, которые рождают пары кварк-антикварк, это и определяет массу протона и нейтрона. Если посмотрим на массу протона 930 МэВ, то масса конституэнтного кварка будет 0,33 ГэВ.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Лекция 7. Взаимодействие частиц. Адроны

Стандартная модель.

Стандартная модель – это теория, которая описывает все взаимодействия частиц с энергиями до нескольких ТэВ. Дальше нет экспериментальных данных. Заведомо известно, что там должны быть явления, которые не должны укладываться в Стандартную модель.

Как из частиц Стандартной модели получить адроны (Рисунок 96). Барионы – частицы, которые имеют барионный заряд B=+1, состоят из трех кварков.

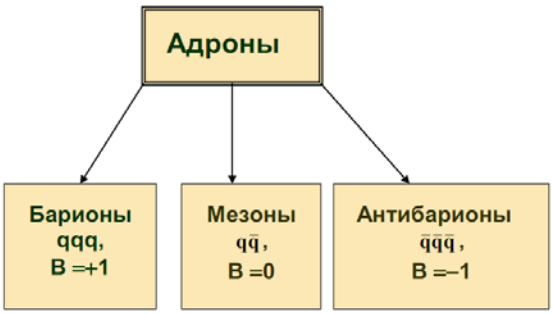


Рисунок 96. Состав адронов

Мезоны состоят из кварка и антикварка, барионное число равно нулю B=0. И антибарионы – состоят из трех антикварков, барионное число B=−1. Кварки объединяются в адронах.

Модель кварков

- Квантовые числа кварков, образующих адрон, определяют квантовые числа адронов. Адроны имеют определенное значение электрического заряда Q, спина J, четности P, изоспина I.
- t-кварк имеет время жизни $\approx 10^{-25}$с, поэтому он не успевает образовать адрон.
- Все многообразие адронов возникает в результате различных сочетаний u-, d-, s- , c-, b- кварков, образующих связанные состояния.
- Барионы состоят из трех кварков
- Мезоны строятся из кварка и антикварка.
- Антибарионы состоят из трех антикварков
- квантовое число – цвет кварка – имеет три значения: красный, синий, зеленый.
- Все известные адроны – бесцветны.

Открытие антипротона

Антипротон должен быть частицей со спином половинка, а электрический заряд должен быть (-1), а масса точно такая же, как у протона. Предполагаем, что так должно быть.

Напишем реакцию, в которой антипротон должен родиться:

$$p + p \to \bar{p} + p + p + p$$

Чтобы сохранялось барионное число справа, нужно добавить 3 протона справа. Электрический заряд тоже сохраняется. Берем пучок протонов, ускоряем, бьем по мишени. Должны рождаться антипротоны. Но проблема в том, что, когда пучком протонов бьем по пучку протонов, а энергии тут ГэВ, рождается колоссальное количество частиц. В том числе, и пи-мезоны, которые имеют положительный заряд, но масса у них меньше. Поэтому ставим магнит, выделяем 2 частицы, ставим квадрупольную линзу, которая фокусирует пучки частиц, дальше ускорительный зал, происходит ускорение частиц, за защитой ставлю детекторы, и частицы проходят по каналу в защите. Основной фон – это протоны и пи-мезоны. Магнит выделяет частицы с одинаковым импульсом. Импульс протона будет равен импульсу пи-мезона. Импульс – это mV. Если частица массивная, то она будет двигаться с меньшей скоростью. Протон – частица массивная, она будет двигаться с меньшей скоростью. Ставлю один счетчик, когда заряженная частицы проходит через него, она дает сигнал, ставлю второй счетчик. Расстояние между счетчиками 12 м. Зная импульс частиц, какая энергия протонов и пи-мезонов, рассчитываю время, за которое протон пролетит это расстояние, и время, за которое пи-мезон пролетит расстояние. Оказывается, что для пи-мезонов нужно $4 \cdot 10^{-9}$с, а антипротону нужно $51 \cdot 10^{-9}$с.

Фон все равно будет большой, потому что число антипротонов маленькое. Поэтому ставим еще 2 черенковских счетчика. Если взять сцинтиллятор, и заряженная частица будет в него попадать, то сцинтиллятор будет светиться. Ставим фотоумножитель и видим свечение. Если брать среды с разными коэффициентами преломления, то получим эффект: есть распространение скорости света в этой среде и есть скорость частицы в этой среде. И скорость частицы может быть больше, чем скорость света в этой среде. Тогда частица, двигаясь в этой среде, поляризует частицы этой среды, и возникает свечение. Это детектор для частиц высокой энергии, потому что всегда можно подобрать среду, в которой миллион частиц будет проходить свободно, а одна частица будет двигаться со скоростью, большей скорости света в этой среде, и будет давать сигнал. Поэтому можем регистрировать частицы высокой энергии. Поэтому помещаем два счетчика. Один регистрирует все частицы, у которых скорость больше, чем 0,99 – регистрирует частицы, которые являются пи-мезонами. А второй счетчик регистрирует частицы с диапазоном $0{,}75 \leq \beta \leq 0{,}79$. Это антипротоны. Ставим счетчики на совпадение и один счетчик на антисовпадение. Получаем, что, когда пролетает антипротон, есть сигнал. Когда пролетает пи-мезон, никакого сигнала нет. Теперь можем регистрировать антипротоны, подтверждаю массу и заряд.

Антинейтрон.

Желательно понять, есть ли антинейтрон. Масса такая же, а заряд у нейтрона нулевой. У антинейтрона - тоже нулевой. Как увидеть антинейтрон?

Напишем реакцию, в которой будут рождаться антинейтроны.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Если в хвост предыдущей установки поместить другой детектор, который будет регистрировать антинейтроны, то происходит вот что (Рисунок 97).

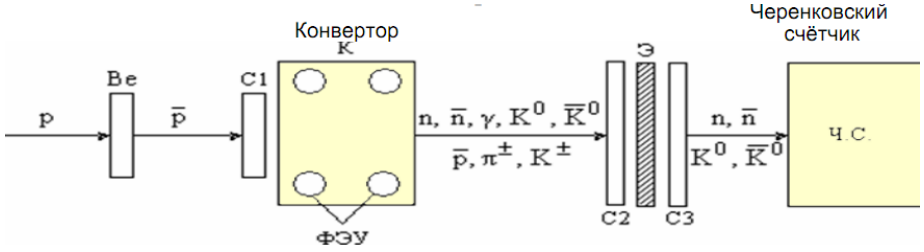


Рисунок 97. Схема эксперимента по регистрации антинейтрона

Летят протоны, мы из них образовали антипротоны, они проходят через сцинтилляционный счетчик, дают сигнал (это означает, что антипротон родился). Теперь он попадает в конвектор. В конвекторе антипротон взаимодействует с протоном конвектора, получается нейтрон и антинейтрон:

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

Суммарный заряд слева и справа равен нулю. Барионное число слева и справа 0. Антипротоны могут взаимодействовать с нейтронами. Тогда

$$\bar{p} + n \rightarrow n + \bar{n} + \pi^{-}$$

π—мезон скомпенсировал электрический заряд, барионный заряд правильный. Надо выловить антинейтроны.

Есть одна реакция: если антинейтрон провзаимодействует с нейтроном, то произойдет аннигиляция и родятся кванты ядерного поля - π^{-} и К-мезоны:

$$n + \bar{n} \rightarrow \text{пионы, каоны}$$

Теперь надо максимально избавиться от фона в конвекторе (будут идти нейтроны, антинейтроны, γ-кванты, протоны, антипротоны, К-мезоны и т.д.). Если хотят избавиться от заряженных частиц, то ставят свинцовый экран, который эти частицы поглощает. Чтобы в этом убедиться, поставим сцинтиллятор и экран. Через экран будут проходить только нейтральные частицы (в том числе – антинейтроны). Нейтрон будет взаимодействовать в детекторе. Антинейтрон взаимодействует в детекторе, родит пионы и каоны, суммарная масса их должна быть больше 2 ГэВ. Поэтому суммарная энергия, которая будет выделяться в этом черенковском счетчике, будет на уровне 2 ГэВ. В результате образуются частицы, и я вижу сигнал. Антинейтрон открыт.

Массы одинаковые, спины тоже одинаковые. Четности разные у частиц и античастиц. Электрические заряды противоположны. Магнитный момент связан с движением электрических зарядов. Электрические заряды имеют противоположный знак, значит, и магнитный момент имеет противоположные знаки. Барионное число: у частиц +В, у античастиц (-В). Изоспин одинаковый, а проекции разные. Странность, очарование, bottom и top имеют противоположные знаки. Важно, то частицы и античастицы имеют одинаковое время жизни. Если частица распадается, то античастица распадается на соответствующие античастицы.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Четность.

Частицы микромира характеризуются еще одним квантовым числом – четностью. Частица описывается волновой функцией. Волновая функция – есть решение уравнения Шредингера. Уравнение Шредингера берется из головы: знаем, какое происходит взаимодействие: H = кинетическая +потенциальная энергия. Нужно понять, откуда берется потенциальная энергия.

Четность – это оператор, действует он на волновую функцию: он меняет координату r на (-r), это зеркальное отражение.

$$\hat{P}\psi(\vec{r}) = \psi(-r) = \begin{cases} \psi(\vec{r}), & p = +1 \\ -\psi(r), & p = -1 \end{cases}$$

Волновые функции бывают двух типов: когда при действии оператора волновая функция меняет знак либо не меняет.

$\psi(-\vec{r}) = \psi(\vec{r})$ – четные функции (состояния)

$\psi(-\vec{r}) = -\psi(\vec{r})$ - нечетные функци (состояния)

В большинстве случаев имеем сферическую систему координат, в которой мы имеем дело со сферическими функциями:

$$Y_{lm}(\pi - \theta, \varphi + \pi) = (-1)^l Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

Здесь стоит орбитальный момент количества движения. Важно, что частица имеет собственный спин, собственный момент количества движения, и может двигаться в этой системе: кварки могут двигаться внутри адрона, электрон может двигаться вокруг атомного ядра и т.д. Электрон имеет спин, равный половинке, и имеет орбитальный момент из-за того, что движется вокруг атомного ядра. Внутри адрона кварк имеет орбитальный момент количества движения и собственный момент количества движения, и они складываются, как предписывает им квантовая теория.

Четность частиц, которые составляют систему частиц, определяется четностью частиц системы и орбитальным моментом каждой частицы:

$$P = \pi_1 \pi_2 \dots \pi_A (-1)^{l_1} (-1)^{l_2} \dots (-1)^{l_3}$$

Внутренняя четность адронов.

Кварки определяют квантовые числа адронов. Как определяется внутренняя четность адронов?

- Четность кварка, по определению равна +1 и не зависит от типа кварка:

$$P(q) = +1$$

- Четность антикварка равна (-1) и не зависит от типа кварка:

$$P(\bar{q}) = -1$$

- Внутренняя четность адрона равна произведению четностей входящих в его состав кварков, умноженному на $(-1)^L$, L –орбитальный момент кварков в составе адрона (сумма l):

$$P(\text{барион}) = P(q_1) \cdot P(q_2) \cdot P(q_3)(-1)^{\bar{l}_{q1}+\bar{l}_{q2}+\bar{l}_{q2}} = (-1)^L$$

$$P(\text{мезон}) = P(q_1) \cdot P(\bar{q}_2) \cdot (-1)^{\bar{l}_{q1}+\bar{l}_{q2}} = (-1)^{L+1}$$

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Мезоны.

Мезоны состоят из кварка и антикварка. Имеют барионное число B = 0 (т.к. B(q)=1/3, B($\bar{q}$)=−1/3, в сумме будет 0). Кварковая модель позволяет качественно описать структуру мезонов и получить их квантовые числа.

Два самых известных мезона (Рисунок 98): π^+ и π^-- мезоны.
Суммируя квантовые числа кварков и антикварков, получаем квантовые числа мезонов. Мы видим, что π^+ и π^-мезоны – это частица и античастица. Отличаться они будут зарядом и проекцией изоспина.

$\pi^+(u\bar{d})$

	u	$\bar{d}$	π^+
Q	+2/3	+1/3	+1
B	+1/3	−1/3	0
J	1/2	1/2	0
I	1/2	1/2	1
I_3	+1/2	+1/2	+1
P	+1	−1	−1

$M(\pi^+) = 139.57\ МэВ$
$\tau(\pi^+) = 2.6 \cdot 10^{-8} c$
$J^P(I) = 0^-(1)$

$\pi^-(\bar{u}d)$

	$\bar{u}$	d	π^-
Q	−2/3	−1/3	−1
B	−1/3	+1/3	0
J	1/2	1/2	0
I	1/2	1/2	1
I_3	−1/2	−1/2	−1
P	−1	1	−1

$M(\pi^-) = 139.57\ МэВ$
$\tau(\pi^-) = 2.6 \cdot 10^{-8} c$
$J^P(I) = 0^-(1)$

Рисунок 6. Квантовые характеристики мезонов

Протон и нейтрон – очень похожи и составляют образование – нуклон. У протона изоспин направлен вверх, у нейтрона – вниз.

π^+мезон имеет изоспин (+1), проекция изоспина (+1), у π^- изоспин (+1), проекция изоспина–(-1). Должна быть еще одна частица, которая будет составлять изотопический триплет: 1,-1,0. Такая частица была найдена - π^0-мезон.

Квантовый состав π^0-мезона - $u\bar{u} - d\bar{d}$. π^+распадается на μ^+ и нейтрино, π^- распадается на μ^- и антинейтрино. А π^0 распадается на 2 γ-кванта. Почему его долго искали? Время жизни π^0 $8{,}4 \cdot 10^{-17}$с. Дело вот в чем. π^+ и π^- имеют электрический заряд. Поэтому он должен распасться на частицу с меньшей массой, но имеющей электрический заряд. Это электрон или позитрон. А π^0 не имеет электрического заряда, поэтому ему не требуется никакая частица с зарядом, он распадается на 2 γ-кванта. Это означает, что этот распад происходит в результате электромагнитного взаимодействия. А распады π^+ и π^- происходят в результате слабого взаимодействия. А слабое взаимодействие, как и положено, слабее электромагнитного, то есть медленнее разрушает частицу.

Есть 5 кварков, из них делаются разные комбинации и получаем разные частицы. Есть одна тонкость, как они между собой внутри адрона связываются. Не

только состав, но как они взаимодействуют внутри адрона, а это определяются их орбитальными движениями внутри адрона.

Протоны.

Перейдем к протонам (Рисунок 98). Это частицы, которые состоят из трех кварков. Протон состоит из (uud)-кварков.

Барионы (qqq)

Протон (uud)

$M(P) = 938.272\ МэВ$

$\tau(P) = стабильный$

$J^P(I) = \frac{1}{2}^+\left(\frac{1}{2}\right)$

Нейтрон (udd)

$M(n) = 939.565\ МэВ$

$\tau(n) = 885.7 \pm 0.8\ c$

$J^P(I) = \frac{1}{2}^+\left(\frac{1}{2}\right)$

$n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$

	u	u	d	p
Q	+2/3	+2/3	–1/3	+1
B	+1/3	+1/3	+1/3	+1
J	1/2	1/2	1/2	1/2
I	1/2	1/2	1/2	1/2
I_3	+1/2	+1/2	–1/2	+1/2
P	+1	+1	+1	+1
s, c, b, t	0	0	0	0

	u	d	d	n
Q	+2/3	-1/3	–1/3	0
B	+1/3	+1/3	+1/3	+1
J	1/2	1/2	1/2	1/2
I	1/2	1/2	1/2	1/2
I_3	+1/2	-1/2	–1/2	-1/2
P	+1	+1	+1	+1
s, c, b, t	0	0	0	0

Рисунок 7. Барионы (протон и нейтрон)

Суммируя квантовые числа кварков, входящих в состав протона, и получаем квантовые числа для протонов. Состав нейтрона – (udd).

Протон от нейтрона отличается зарядом, проекцией изоспина (u (+1/2) и d (-1/2) кварки передали это протону и нейтрону, протон получил (+1/2), нейтрон – (-1/2)). Кварковые числа сформировали квантовые числа адрона.

Протон – частица стабильная, у нейтрона среднее время жизни 886 с, дальше распадается на протон, электрон и антинейтрино электронное. Лептонные числа сохраняются. Обязательно должен распасться, передав барионное число протону, если родил протон, то должен передать кому-то электрический заряд, чтобы он сохранялся.

Кварковая структура барионов.

Барионы состоят из трех кварков (Рисунок 99).

Внизу даны известные резонансы. Может быть элементарная частица, которая имеет электрический заряд (+2) единицы. Это Δ^{++}. По мере того, как d кварк меняется на s кварк, масса растет.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Барионы — связанные состояния трёх кварков

Частица	Кварковый состав	Масса, mc^2 (МэВ)	Время жизни (с) или ширина (МэВ)	Спин, чётность, изоспин $J^P(I)$	Основные каналы распада
p	uud	938.272	$>10^{31}$лет	$1/2^+(1/2)$	
n	udd	939.565	885.7±0.8	$1/2^+(1/2)$	$pe^-\nu$
Λ	uds	1115.683	$2.63\cdot10^{-10}$	$1/2^+(0)$	$p\pi^-, n\pi^0$
Σ^+	uus	1189.37	$0.802\cdot10^{-10}$	$1/2^+(1)$	$p\pi^0, n\pi^+$
Σ^0	uds	1192.64	$7.4\cdot10^{-20}$	1/2+(1)	$\Lambda\gamma$
Σ^-	dds	1197.45	$1.48\cdot10^{-10}$	1/2+(1)	$n\pi^-$
Ξ^0	uss	1314.8	$2.9\cdot10^{-10}$	1/2+(1/2)	$\Lambda\pi^0$
Ξ^-	dss	1321.3	$1.64\cdot10^{-10}$	1/2+(1/2)	$\Lambda\pi^0$
Ω^-	sss	1672.4	$0.81\cdot10^{-10}$	3/2+(0)	$\Lambda K^-, \Xi^0\pi^-$
Δ^{++} Δ^+ Δ^0 Δ^-	uuu uud udd ddd	1230-1234	115-125	$3/2^+(3/2)$	$(p,n)\pi^{0,\pm}$

Рисунок 99. Кварковая структура барионов

Барионы

Имеем систему барионов, которая состоит из трех кварков.

Состав uud имеют несколько частиц: протон, Δ^+, нуклонные резонансы $N^+(1440)$ и $N^+(1520)$. Кварковый состав одинаковый, но массы разные. Это связано с тем, что разные значения спина. Спин протона равен половинке. Он складывается из трех ½, получается половинка. Еще он может дать 3/2, это будет Δ^+- резонанс. Взаимодействие кварков зависит от того, как направлены их спины. Взаимодействие нуклонов зависит от того, как направлены их спины.

Кварки, образующие p и Δ^+, находятся в состоянии (n=1, l=0)

Кварки, образующие $N^+(1440)$, находятся в состоянии (n=2, l=0)

Кварки, образующие $N^+(1520)$, находятся в состоянии (n=1, l=1)

Все определяется квантовыми числами кварков внутри адрона.

Фундаментальные взаимодействия. Калибровочные бозоны.

Имеются адроны, кварки. Адроны взаимодействуют между собой за счет обмена мезонами. Истинное взаимодействие – это кварки, и как они взаимодействуют внутри адрона. Адроны могут взаимодействовать в результате сильного взаимодействия, оно меняет цвет глюонов, кварков.

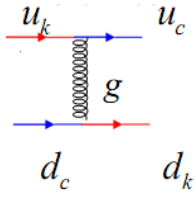


Рисунок 8. Сильное взаимодействие

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Был u кварк красного цвета, он провзаимодействовал с глюоном и стал синего цвета, тип кварка не изменился.

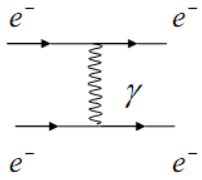


Рисунок 9. Электромагнитное взаимодействие

Электромагнитное взаимодействие (Рисунок 101): в нем участвуют все заряженные частицы, переносит его безмассовый фотон со спином 1. Летит электрон, этот электрон испустил фотон, этот его поглотил. Дальше имеем в конченом состоянии электрон и электрон.

Слабое взаимодействие (Рисунок 102) — это протон с нейтрино взаимодействует, происходит обмен W-бозоном. Протон превратился в нейтрон, нейтрино превратилось в позитрон. Электрический заряд (+1) сохраняется, барионное число (1), лептонные числа (-1).

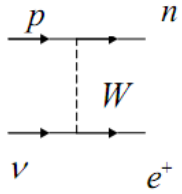


Рисунок 10. Слабое взаимодействие

Взаимодействие кварков.

Электромагнитное взаимодействие (Рисунок 103): кварки в вершинах взаимодействия, есть линия фермионов (кварк и кварк) и линия γ-квантов (линия бозонов). Кварки участвуют в электромагнитном взаимодействии, испуская или поглощая γ-квант, при этом ни цвет, ни тип (аромат) кварков.

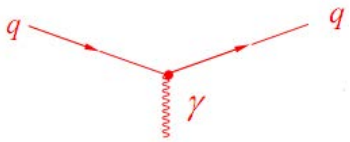


Рисунок 11. Электромагнитное взаимодействие

Кварки участвуют в слабых взаимодействиях (Рисунок 104), испуская $W^{\pm}$-бозон, при этом изменяется тип кварка, цвет кварка остается без изменений.

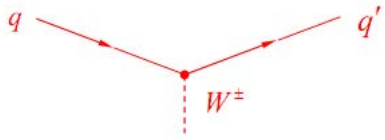


Рисунок 12. Слабое взаимодействие

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Кварки участвуют в сильных взаимодействия (Рисунок 105): излучая или поглощая глюон, при этом кварк остается, каким был, но меняется его цвет.

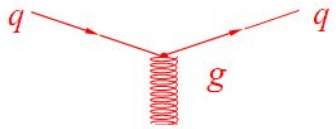


Рисунок 13. Сильное взаимодействие

q-q потенциал.

Мы идем по пути наименьшего сопротивления, знаем, как между собой взаимодействуют кварки, можем записать потенциал. Нужно построить такой потенциал, чтобы кварки свалились в потенциальную яму (беру член с $\frac{1}{r}$), но, с другой стороны, кварк не должен вырваться из адрона (член kr). Потенциал кварк-кваркового взаимодействия есть

$$V_{q\bar{q}} = -\frac{4}{3}\frac{\alpha_s \hbar c}{r} + kr$$

Был кварк-антикварк, начинаем их растягивать, приводит к тому, что пружинка обрывается и кварк захватил второй антикварк из вакуума, получился пи-мезон, антикварк, который был, захватил кварк из вакуума, образовался мезон. Так они размножаются. Это как магнит, который ломают пополам, и получаются 2 магнита. Так же устроено кварк-кварковое взаимодействие внутри адрона.

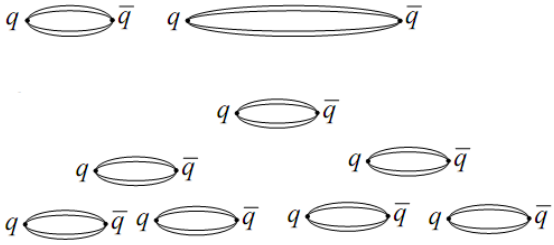


Рисунок 14. Q-Q потенциал

Цветное взаимодействие

Летит кварк красного цвета, он превратился в кварк зеленого цвета. Здесь был кварк зеленого цвета, превратился в красный кварк. Что-то должно менять цвет кварка.

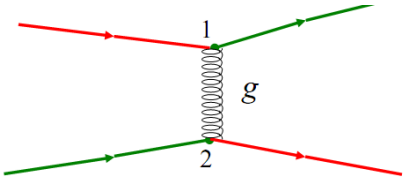


Рисунок 15. Цветное взаимодействие

Это может сделать глюон. Он должен иметь цвета, чтобы изменять цвет кварка.
Глюон имеет спин J= 1, четность P=−1.

Имеется 3 цвета (Рисунок 108): красный, зеленый, синий, и 3 антицвета ($\bar{к}$, $\bar{з}$, $\bar{с}$). Точно так же, как в ситуации с аннигиляцией, мы должны взять зеленый цвет, добавить антизеленый, и цвет исчезнет. Но с глюоном так поступит нельзя, при взаимодействии с кварком, он должен изменить его цвет. Поэтому имеем 9 комбинаций из всех этих цветов. Но есть диагональ $к\bar{к}$, $з\bar{з}$, $с\bar{с}$. Из этих цветов мы можем построить бесцветную комбинацию, но такого глюона не бывает. Было 9 комбинаций, одну мы выкинули ($к\bar{к} + з\bar{з} + с\bar{с}$), образовалось 8. 8 глюонов являются переносчиками цветного взаимодействия между кварками – меняют цвет кварка, не меняя тип кварка.

	$\bar{к}$	$\bar{з}$	$\bar{с}$
к	$к\bar{к}$	$к\bar{з}$	$к\bar{с}$
з	$з\bar{к}$	$з\bar{з}$	$з\bar{с}$
с	$с\bar{к}$	$с\bar{з}$	$с\bar{с}$

Рисунок 16. Парные комбинации цвет-антицвет

Кварки имеют сильное взаимодействие (потому что они окрашены). А чем глюоны хуже? Они тоже имеют цвет-антицвет, значит, могут между собой взаимодействовать.

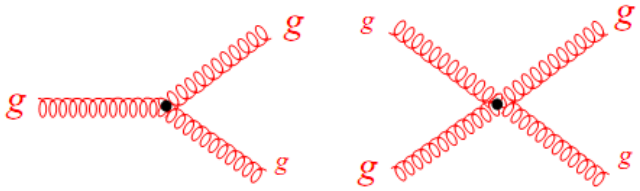


Рисунок 17. Возможные взаимодействия при участии глюона

Глюон (Рисунок 109) может породить второй и третий глюон (распасться на 2 глюона), и эти 2 цветных глюона тоже могут провзаимодействовать. Таким образом, кварки внутри адрона связаны глюонами, глюоны между собой тоже взаимодействуют. А это может приводить к тому, что может рождаться кварк-антикварк. Внутри протона очень сложная комбинация: там есть токовые кварки, которые связаны между собой глюонами, глюоны рождают кварки, они могут родить на мгновение не только $u\bar{u}$, $d\bar{d}$, но и $s\bar{s}$-кварки (они ближе), $c\bar{c}$-кварки (нужна больше энергия, поэтому реже рождаются) и т.д. Протон, который находится в нас, кипящая комбинация, которая все время бурлит, одно превращается в другое. Дальше в ядре протоны и нейтроны между собой взаимодействуют потому, что кварк, когда пытается взаимодействовать с другим кварком нейтрона внутри ядра, он не может выйти и перейти туда, он посылает пи-мезон. В результате взаимодействия протона и нейтрона появляется остаточное некое взаимодействие между кварками и глюонами. Это та же самая комбинация, как в молекулярной физике – силы Ван-дер-Ваальса: есть электромагнитное взаимодействие, которое имеет определенный потенциал, но когда сближаете 2 атома, то взаимодействие более сложное, потому что взаимодействуют электронные оболочки

одного атома с электронными оболочками другого атома. Электроны здесь взаимодействуют с ядром тут, ядра тут взаимодействуют с этим электроном и так далее. Все описывается просто – вводим потенциал Ван-дер-Ваальса. NaCl передал электрон атому Cl, Cl стал отрицательно заряженный, Na стал положительно заряженный, ионная связь. То же самое у нас: кварки рождают мезоны, мезоны осуществляют взаимодействие между адронами, и картина довольно понятная, но сложная. Описывать это можно в рамках квантовой электродинамики.
Пример (Рисунок 110):

$$q(\kappa)+g(\bar{\kappa}c)\rightarrow q(c)$$

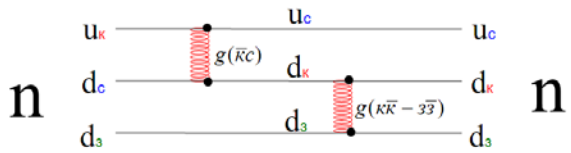


Рисунок 18. Пример взаимодействия кварка с глюоном

Нейтрон состоит из (udd) кварков, u кварк – красного цвета, глюон перенес взаимодействие и превратил его в синий. Этот синий кварк, поглотив глюон, превратился в красный кварк. Опять глюон изменил цвет двух кварков, но в сумме нейтрон остался бесцветным.

W^+, W^- и Z бозоны.

Эти частицы переносят слабое взаимодействие.

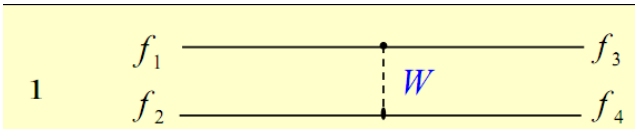


Рисунок 19. Диаграмма взаимодействия

(Рисунок 110) Фермион f_1 испускает W-бозон, превращается в f_3., фермион f_2 превратился в фермион f_3.

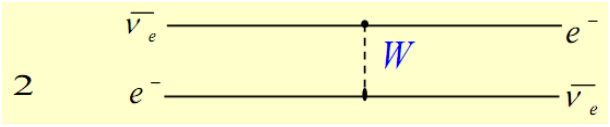


Рисунок 20. Взаимодействие с W-бозоном

(Рисунок 113) Антинейтрино испускает W-бозон, превращается в электрон. Электрон поглотил W-бозон и превратился в антинейтрино.

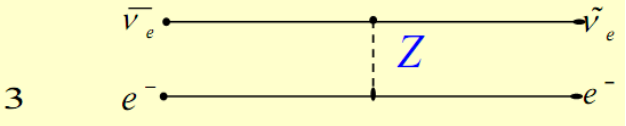


Рисунок 21. Взаимодействие антинейтрино с Z-бозоном

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Z-бозон переносит взаимодействие, но не меняет тип частицы (лептонов и кварков).

Опишем распад нейтрона с помощью W-бозона (Рисунок 114).

Имеется нейтрон, он испустил W-бозон (с отрицательным зарядом), стал положительным, а W-бозон распался на электрон и антинейтрино электронное.

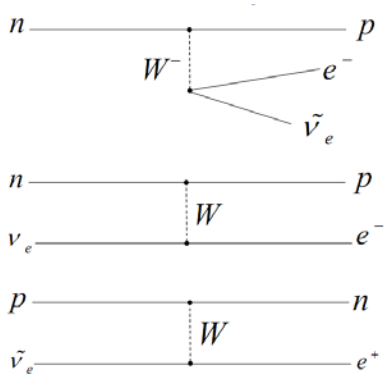


Рисунок 22. Распад нейтрона

Важный момент: взаимодействие нейтрона с нейтрино электронным. Происходит обмен W-бозоном. Каким – положительным или отрицательным? Если стрелка идет вертикально, то нейтрон может испустить W^- и превратиться в протон, этот поглотит отрицательный и превратится в электрон, либо испустит W^+ и превратится в протон, плюс получается отрицательная частица. Если нет направления стрелы времени, то нельзя однозначно сказать, какой W бозон испустился. В нашей ситуации нельзя сказать W^+ или W^-.

Образование W и Z бозонов.

Как обнаружить бозоны? Сталкиваем протон с антипротоном, получаем $W^{\pm}$ и X, где X – это частицы, которые получаются в дополнение к W бозону. Это могут быть пи-мезоны, к-мезоны, электроны, нейтрино, все, что угодно. И при столкновении протона с антипротоном может получиться Z бозон.

$$p + \bar{p} \to W^{\pm} + X$$

$$p + \bar{p} \to Z + X$$

X – разные в этих реакциях. На кварковом уровне это выглядит так (Рисунок 115):

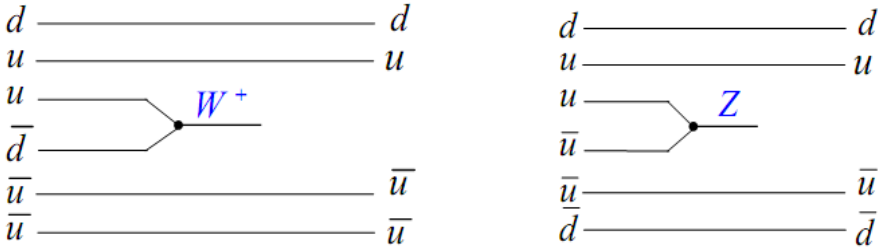


Рисунок 23. Взаимодействие на кварковом уровне.

Протон duu, антипротон $\bar{d}\bar{u}\bar{u}$. U кварк протона столкнулся с $\bar{d}$. кварком антипротона, образуется W^+, который полетел, и будет распадаться, его надо ловить.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Или u кварк протона столкнулся с $\bar{u}$ кварком антипротона, получился Z-бозон, его надо ловить. W и Z – бозоны могут распадаться разными каналами с образованием электронов, мюонов, кварков и т.д. Если начнем искать по распадам кварков, то мы его не увидим: будет много комбинаций, и выделить массу W-бозона окажется сложным. Характерной изюминкой распада W-бозона является то, что он распадается и получается электрон и нейтрино. Причем, если распад происходит по такому каналу, то W-бозон имеет массу 80 ГэВ, перпендикулярно оси столкновения вылетает электрон, который имеет массу 40 ГэВ (половину массы берет нейтрино, половину – электрон). Видим событие, что столкнулся протон с антипротоном и перпендикулярно оси летит электрон. Либо столкнулся u и $\bar{u}$ кварк и перпендикулярно оси столкновения полетел электрон с энергией 40 ГэВ, вниз полетел позитрон. Это был Z-бозон.

Для поиска был построен ускоритель. Происходило столкновение протона с антипротоном, дальше видим распады бозонов (Рисунок 116).

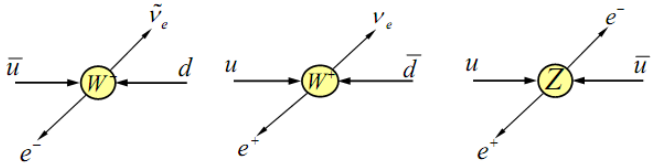


Рисунок 24. Распады бозонов.

Ван дер Меер построил ускоритель, Руббиа доказывал, что W-бозон надо открывать, был инициатором этого поиска. В Церне запустили ускоритель, впервые эта реакция была получена.

Так же история была с бозоном Хиггса. Ученые сказали, что такой бозон должен быть, надо строить ускоритель, примерно сказали, где должна быть энергия (точно сказать нельзя), начали эксперименты, и обнаружили.

Доказательством распада W-бозона является событие с одним электроном, летящим с энергией 40 ГэВ в поперечном направлении, и нейтрино (с недостающим поперечным импульсом примерно 40 ГэВ/с) в противоположном относительно электрона направлении.

Для идентификации Z-бозона установка должна зарегистрировать электрон и позитрон, летящие в противоположные стороны в поперечном направлении с одинаковыми энергиями примерно 45 ГэВ.

С одной стороны идет пучок протонов, с другой – антипротонов, они сталкиваются, вылетают частицы. Детекторы сложные. Видим следы электронов, заряженных частиц. Энергия протонов и антипротонов 270 ГэВ. Энергия выбрана такой, потому что нужно, чтобы энергия у кварка и антикварка была 40 ГэВ. Остальная часть энергии от 270 ГэВ будет уноситься другими частицами в составе протона и антипротона. Сечение $\sigma(W^{\pm}) = 10^{-33}$ см^2. Число столкновений протонов и антипротонов - 10^9. Увидели всего 6 $W^{\pm}$-бозонов.

Заряд W^+-бозонов $Q=\pm 1$

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Спин J=1
Масса m=80,419±0,056 ГэВ
Ширина распада Г=2,4952±0,0023 ГэВ.

W-бозон распадается на позитрон и нейтрино электронное, мюон и нейтрино моюнное, тау-лептон и нейтрино тау. Если посмотреть на числа напротив реакций, то можно сделать вывод, что это позитрон, мюон и тау - абсолютно одинаковые частицы (кроме массы), они одинаково взаимодействуют. Наверху оказалась частица, которая имеет 40 ГэВ, а эти 3 частицы оказались внизу: 0,5 МэВ, 105 МэВ, 1777 МэВ. По сравнению с 80 ГэВ – это мало. Поэтому одинаковые каналы распада. Зачем природе понадобилось умножать все процессы, которые происходят, на 3 – загадка.

$$W^+ \to e^+\nu_e \qquad (10.66 \pm 0.20)\%$$
$$W^+ \to \mu^+\nu_\mu \qquad (10.49 \pm 0.29)\%$$
$$W^+ \to \tau^+\nu_\tau \qquad (10.4 \pm 0.4)\%$$
$$W^+ \to адроны \qquad (68.5 \pm 0.6)\%$$

Рисунок 25. Каналы распада W-бозонов

Посмотрим на Z-бозон. Каналы распада следующие (Рисунок 118):

$$Z \to e^+e^- \qquad (3.367 \pm 0.005)\%$$
$$Z \to \mu^+\mu^- \qquad (3.367 \pm 0.008)\%$$
$$Z \to \tau^+\tau^- \qquad (3.371 \pm 0.009)\%$$
$$Z \to inv \qquad (20.02 \pm 0.006)\%$$
$$Z \to адроны \qquad (69.84 \pm 0.07)\%$$

Рисунок 26. Каналы распада Z-бозона

Z-бозона распадается на e^+e^-, $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$. Посмотрим на цифры. Z-бозон точно так же не видит различия между электроном, мюоном и тау-лептоном, что подтверждает наши представления о том, что эти 3 семейства имеют примерно одинаковую природу.

Наконец, измерена полная ширина распада (Рисунок 119). Отсюда можно сказать, сколько поколений нейтрино может быть.

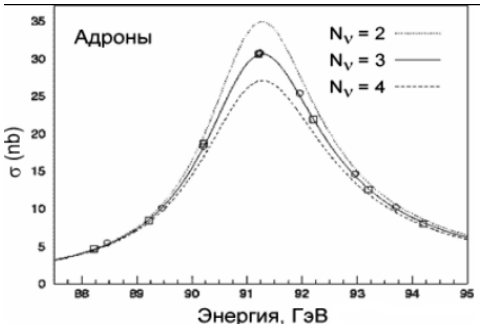


Рисунок 27. Полная ширина распада

Экспериментальные данные хорошо ложатся на число поколений нейтрино, равное 3. То есть, если массы нейтрино меньше, чем масса W-бозона, Z-бозона, то число

нейтрино в этой области не должно быть больше 3. Значит, число поколений тоже не должно быть больше 3.

Нейтральные слабые токи.

Электрон может испустить Z-бозон, превратиться или остаться без изменений, нейтрино испускает Z-бозон и тоже остается без изменений, u и d кварки испускают Z – бозон и не меняются. Это так называемые нейтральные токи (Рисунок 120).

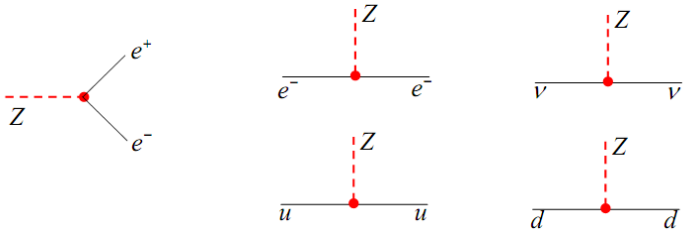


Рисунок 28. Нейтральные токи

Электрон взаимодействует с нейтрино путем обмена Z –бозоном (Рисунок 121).

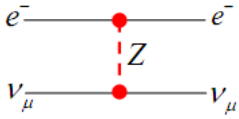


Рисунок 29. Взаимодействие электрона с нейтрино

Масса Z-бозона известна.

Решим пример: исходя из характеристик переносчиков слабого взаимодействия, определить радиус слабых сил.

Радиус действия слабых сил a_w связан с массой переносчиков взаимодействия. $R_w \approx \frac{\hbar c}{m_w c^2} \approx \frac{\hbar c}{m_z c^2} \approx 10^{-15}$. Радиус протона $\approx 10^{-13}$, радиус взаимодействия в сто раз меньше!

Так как $m_z \approx m_w \approx 100$ ГэВ/c^2, имеем

$$R_w \approx \frac{0{,}2 \text{ ГэВ} \cdot \text{Фм}}{100 \text{ ГэВ}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Фм}.$$

Как, используя диаграммы, можно описать распады (Рисунок 122).

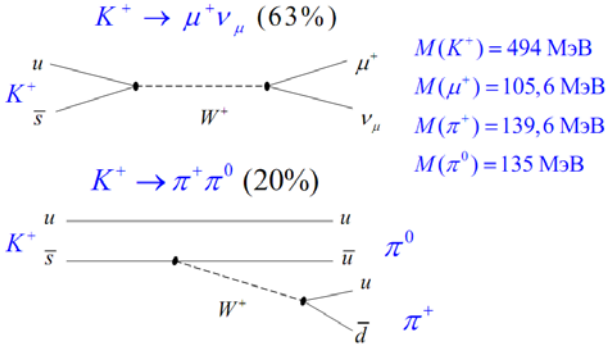


Рисунок 30. Диаграммы распадов.

K^+ мезон состоит из u и $\bar{s}$ кварков. Они аннигилируют, появляется W^+-бозон. Дальше он распадается на μ^+, ν_μ.

K^+ может распасться на π^0, π^+. $\bar{s}$ кварк испускает W^+-бозон, он превращает его в $\bar{u}$-кварк. $u\bar{u}$ - ′это π^0, а $u\bar{d}$ - ′это π^+.

Проверка гипотезы цветных кварков.

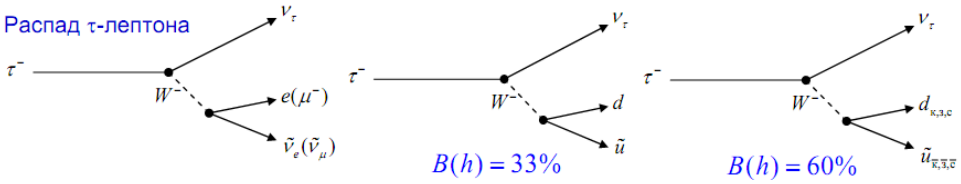


Рисунок 31. Распад тау-лептона

τ^- может испустить (Рисунок 123) W—бозон и превратиться в тау-неутрино, а бозон может распасться на электрон и антинейтрино электронное, мюон и антинейтрино мюонное. Тау-лептон может распасться с испусканием адронов, тогда бозон превращается в $d\bar{u}$. Если кварки цветные, то это не один кварк, а три – красный, синий, зеленый. Тогда правая проекция должна составлять 60% этих распадов.

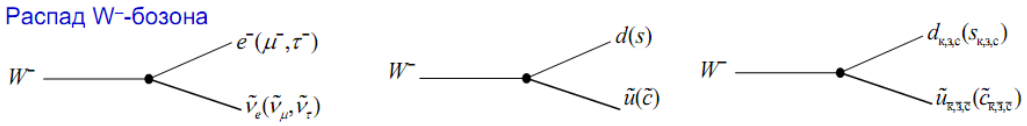


Рисунок 32. Распад W-бозона

Если цвет отсутствует (Рисунок 124), то вероятность распада по этому каналу 40%, если три кварка имеют цвет, то вероятность распада 66%.

Константа сильного взаимодействия

На самом деле она – не константа. Есть явление конфайнмента. Когда кварки находятся на большом расстоянии, константа сильного взаимодействия порядка $\alpha_s(1\text{Фм}) \approx 1 - 2$. Если сближаемся (они внутри адрона), то $\alpha_s(0{,}1\text{Фм}) \approx 0{,}31$.Когда сдвигаются на расстояние 0,001Фм $\alpha_s(0{,}001\text{Фм}) \approx 0{,}105$.

Оказывается, когда кварки находятся внутри адрона, можно все хорошо считать. Но когда пытаемся вытащить их из адрона, на расстояние порядка 1 Фм, константа взаимодействия становится 1, и взаимодействие становится сложным, потому что надо учитывать все многообразие частиц, которое при этом получается.

Лекция 8. Распады частиц.

В основе Стандартной модели лежит представление о том, что есть фундаментальны частицы Стандартной модели, три семейства частиц. В каждом семействе имеется 2 лептона, заряженный лептон и нейтральный партнер - нейтрино: это электрон и нейтрино электронное, мюон и нейтрино мюонное, тау-лептон и тау-нейтрино. Кварки в каждом семействе: up-down, charm-strange, top-bottom. Но все кварки имеют три цвета, и так, где u, там 3 кварка – красный, синий, зеленый. Кварки спрятаны внутри адрона, если пытаемся его вытащить, то за счет того, что он притягивает из вакуума кварки-антикварки, он превращается в мезон, адрон и т.д. Поэтому кварки наблюдаются в виде струй.

Мы формулируем правила, согласно которым, если мы хотим сформировать сильно взаимодействующую частицу, а их 2 типа, то барион строится из трех кварков, мезон строится из кварка и антикварка. Антибарион строится из трех антикварков.

Возьмем пи-мезоны и будем обстреливать протоны. Увидим картинку (Рисунок 125). По оси X отложена энергия пи-мезона. Видим резонансные состояния, полное сечение, сечение упругого рассеяния.

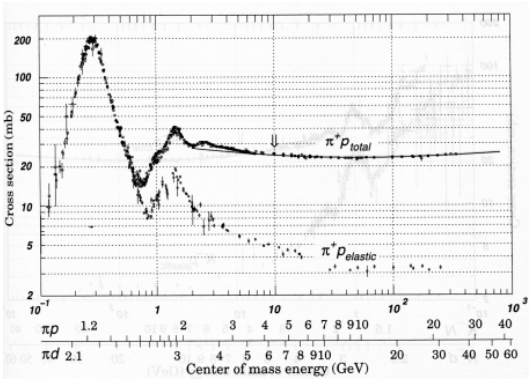


Рисунок 33. Резонансы в реакции взаимодействия пи(-)-мезона с протоном.

Взаимодействует π^+мезон (Рисунок 126). Картинки не похожи, потому что взаимодействие зависит от изоспина частицы. Спин π^+- мезона равен (1), проекция изоспина (1). У π^-- мезона проекция изоспина (-1). Протон имеет изоспин половинка, когда складываем (1+1/2), то получаем состояние, называемое возбуждением протона.

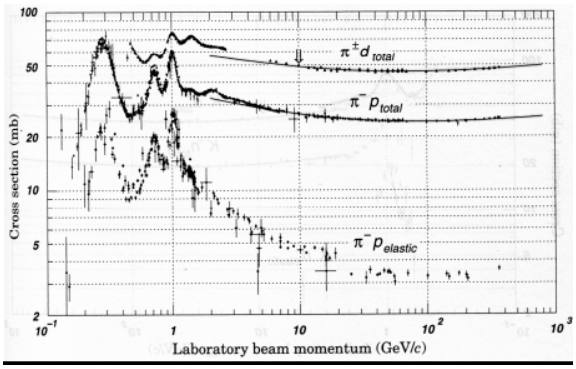


Рисунок 34. Взаимодействие пи+- мезона с протоном

Наблюдение резонансов.

Рассмотрим 2 картинки. На левой картинке внизу столкнулись две частицы (получился шарик), образовалась составная система, которая развалилась на три частицы. Если между этими тремя частицами есть взаимодействие, но нет связи между какими-то двумя частицами, то все три частицы будут вылетать равномерно (4π). Если между частицами будет связь (например, между второй и третьей), то после того, как резонансная система распалась на 2 состояния: частица 1 и на резонанс частицы 2 и 3.

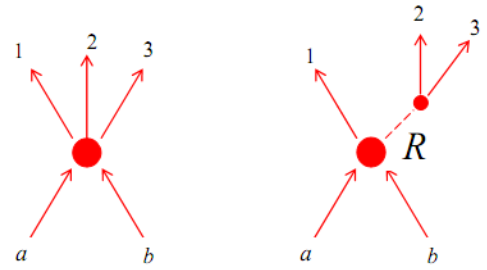


Рисунок 35. Две возможности протекания резонанса: без промежуточного резонанса (слева) и с образованием промежуточного резонанса (справа)

В системе центра масс мы столкнули, сюда полетела частица 1, туда резонанс и дальше распался. Тогда эти частицы будут скоррелированы относительно этой частицы. Изучая корреляцию между частицами 1,2,3, я вижу, что частицы 2 и 3 связаны, получается резонансное состояние.

Массу резонанса можно рассчитать из соотношения:

$$m_{23}^2c^4 = (E_2 + E_3)^2 - c^2(\overline{p_2} + \overline{p_3})^2$$

Где E_2, E_3 - энергии частиц 2 и 3.

Если резонанса нет, то все это размазано, а если есть, то он будет сидеть при одной определенной энергии.

Резонансы – это такие же элементарные частицы, которые распадаются в результате сильного взаимодействия за время $10^{-23} - 10^{-24}$с. Поэтому мы наблюдаем их в виде узкого резонансного состояния.

Δ резонанс

Самый известный резонанс — это первое возбужденное состояние протона.

В ядерной физике есть ядро, а есть его возбужденное состояние. Например, ядро алюминия 27. Это первое возбужденное состояние, второе, третье, четвертое. Но это ядро алюминия 27. В физике частиц ситуация другая. Есть протон, а возбужденное состояние протона – это отдельная частица. Первое возбужденное состояние протона – это Δ резонанс.

Δ резонансы бывают: Δ^{++}, Δ^{+}, Δ^{0}, Δ^{-}. Наверху записан заряд. Они распадаются:

$\Delta^{++}-$ распадается на протон и π^+

Δ^{+}- на протон и π^0 и π^+, на нейтрон

Δ^{0} - распадается на π^0 и π^-, на протон и нейтрон

Δ^- распадается только на нейтрон и π^-, чтобы закон сохранения электрического заряда выполнялся.

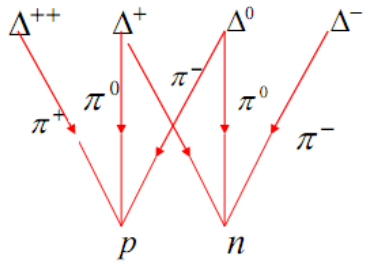


Рисунок 36. Основные каналы распада дельта-резонансов

Имеется резонансное состояние, которое распадается преимущественно на нуклоны и пи-мезоны. Если знаете изоспиновые состояния, то в одном случае π^+и протон будет изоспин, равный 3/2, а π^- плюс протон будет другое состояние ½. Дальше, изучая распады, смотрим, как взаимодействие зависит от изоспина.

Сильные распады адронов.

Есть адрон, Δ^-резонанс, он состоит из нейтрона и π^- мезона. Состоит из ddd кварков, каждый из которых имеет заряд (-1/3), поэтому получается Δ^-.

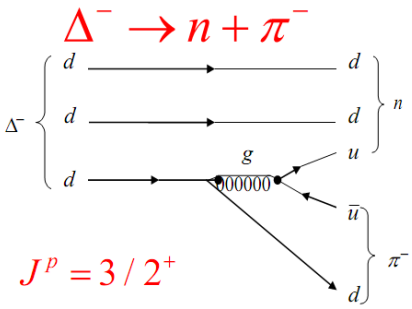


Рисунок 37. Дельта-минус резонанс

d кварк испускает глюон. Глюон не меняет тип кварка, меняет только цвет. Глюон распался на $\bar{u}$ и d кварки. Получили нейтрон и π^-- мезон.

Электромагнитные и слабые распады.

Рассмотрим распад: $\Sigma^0 \to \Lambda + \gamma$

Время электромагнитного распада $\tau = 7{,}4 \cdot 10^{-20}$с.

Строим Σ^0, это uds, странность должна быть (-1), распадается на Λ, кварковый состав одинаковый, и гамма-квант. Испускание γ - кванта кварковый состав не меняет. Масса $M(\Sigma^0) = 1193$ МэВ, $M(\Lambda) = 1116$ МэВ. Этот фотон будет уносить часть энергии, а часть энергии уносит Λ - частица.

Рассмотрим распад Σ^+частицы. Она распадается на протон и π^0-мезон.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Странность отлична от нуля, остальные частицы не странные. Чтобы распад происходил, нужно чтобы изменилась странность. Она изменяется в результате слабого взаимодействия. Время распада $\tau = 0{,}8 \cdot 10^{-10}$с. Распад происходит из-за того, что образуется W-бозон, который потом распадается. W-бозон меняет тип кварка (s кварк превратился в u кварк), и сам распадается на $\bar{u}$ и d. Комбинируем и получаем протон и π^0-мезон. Различие в распадах заключается в следующем. Протон – самая легкая частица, которая имеет барионный заряд, равный (+1), она никому его отдать не может. Поэтому эта частица является стабильной. Казалось бы, протон может распасться на π^+- мезоны, сейчас ищут такой распад. Но это возможно только в том случае, если барионный заряд не сохраняется. Если мы найдем, то скажем, что барионный заряд сохраняется не абсолютно, а с точностью в каком-то 25-ом знаке. Изучая распады, мы устанавливаем определенные законы сохранения.

Слабые распады адронов.

Сильные взаимодействия приводят к рождению разных частиц. Электромагнитные взаимодействия рождают атомы (ядро и электроны связаны за счет электромагнитного взаимодействия). Слабые распады приводят к тому, что все распадется: нестабильные ядра распадаются в результате $\beta^+\beta^-$ - распада, сигма распадается.

Чтобы частица распалась, она должна иметь большую собственную энергию. Имеем 6 кварков (Рисунок 130): u,d, s, c, b, t. Самые тяжелые кварки t –кварки, он распадается, получается b-кварк, b распадается и превращается в c – кварк, (идем так, а не по вертикали потому, что W-бозон меняет электрический заряд), c – кварк распадается на s-кварк, s- кварк распадается на u,d кварки. В конечном состоянии имеем u и d варки, а это протоны и нейтроны.

Рисунок 38. Слабые распады адронов

Есть еще прелестные частицы, очарованные и странные.

Распад s-кварка.

Распады s-кварков мы увидим (Рисунок 131), когда они будут распадаться, превращаясь в другие типы кварков.

$$K^+(u\bar{s}) \to \pi^0(u\bar{u}) + e^+ + \nu_e$$

ν_e возникает потому, что должен сохраниться лептонный заряд. Диаграмма Фейнмана выглядит так: $\bar{s}$ распадается на π^0-мезон, состоящий из $(u\bar{u})$, испускает W^+-бозон, который распадается на позитрон и электронное нейтрино. Нейтрино появляется потому, что лептонный заряд должен сохраняться.

$M(K^+) = 4{,}94$ МэВ

$M(\pi^0) = 135$ МэВ

$\tau(K^+) = 1.2 \cdot 10^{-8}$с (потому что слабый распад)

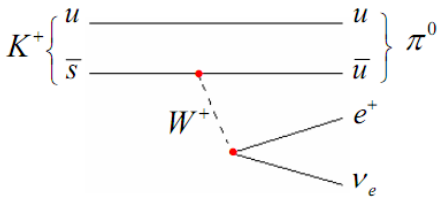


Рисунок 39. Распад s-кварка

K^+-мезон одновременно может распасться и на (Рисунок 171) u и $\bar{s}$ сомкнутся, исчезнут, образуется W^+, которое распадается на позитрон и нейтрино электронное либо на мюон и нейтрино моюнное.

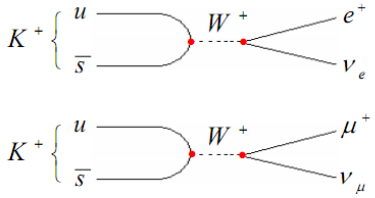


Рисунок 40. Диаграмма Фейнмана для распада s-кварка.

Распад c-кварка.

С-кварк может распасться двумя способами. Это слабый распад.

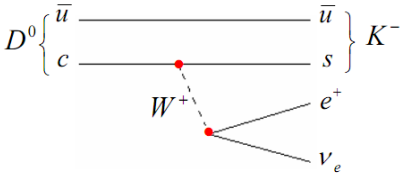


Рисунок 41. Распад c-кварка 1.

Берем D^0-мезон, это $(\bar{u}c)$. С-кварк распался, превратился в s кварк, $(\bar{u}s)$ дали K^- – бозон, а W-бозон распался на позитрон и нейтрино электронное. Период полураспада, или среднее время жизни $\tau = 4.1 \cdot 10^{-13}$с. Вероятность распада – 3%.

D^0 может распасться и так (Рисунок 134):

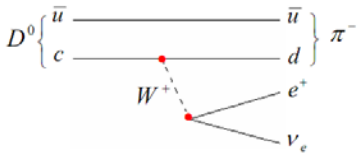


Рисунок 42. Распад c-кварка 2

С-кварк превращается в d кварк, ($\bar{u}$d) дают π^-мезон, а W-бозон так же распадается на позитрон и нейтрино электронное. Вероятность процесса $(3{,}7 \pm 0{,}6) \cdot 10^{-3}$, это абсолютная величина. Этот распад подавлен по сравнению с первым потому, что в первом случае – одно семейство, а здесь с кварк превращается в частицу из другого семейства. Поэтому распады c→ s происходят гораздо чаще, чем распады c→ d.

Распад b-кварка

Вначале построим частицу, в которую входит b кварк или $\bar{b}$. B^0 – это ($b\bar{b}$). Масса этой частицы 5,3 ГэВ. Она распадается (Рисунок 135): $\bar{b}$ распадается на $\bar{c}$, испустив W^+, который распадается на позитрон и нейтрино. Вероятность этого распада составляет 2%.

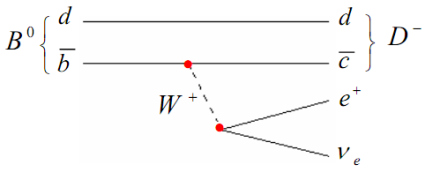


Рисунок 43. Распад b кварка 1.

Но есть второй вариант распада (Рисунок 175). Тут он из первого поколения превращается в частицу третьего поколения: $\bar{b}$. Испускает W-бозон, образуется $\bar{u}$ (частица другого поколения), W-бозон распадается так же. (d$\bar{u}$) дают π^-- мезон. Вероятность распада $(1{,}0 \pm 0{,}6) \cdot 10^{-4}$.

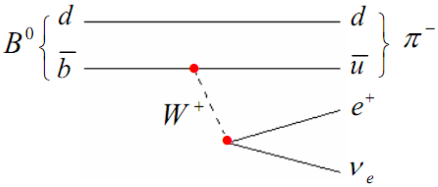


Рисунок 44. Распад b - кварка 2

Распады b → c происходят гораздо чаще, чем распады b → u.
В результате слабых распадов, частица испускает W-бозон, превращается в частицу другую, а W-бозон дальше распадается по-разному: либо в электрон – нейтрино, мюон - антинейтрино мюонное. Если энергия достаточная, то хвост можем заменить.
В конце слабых распадов получаются лептоны.

Образование D^{**} резонанса в реакции $\nu_\mu + p$.

Рассмотрим процесс (Рисунок 137): нейтрино мюонное бьет по протону, появляется резонансное состояние D^{**}, а чтобы выполнялись законы сохранения барионного числа, лептонных чисел, появляются протон и μ^- (раз нейтрино мюонное).

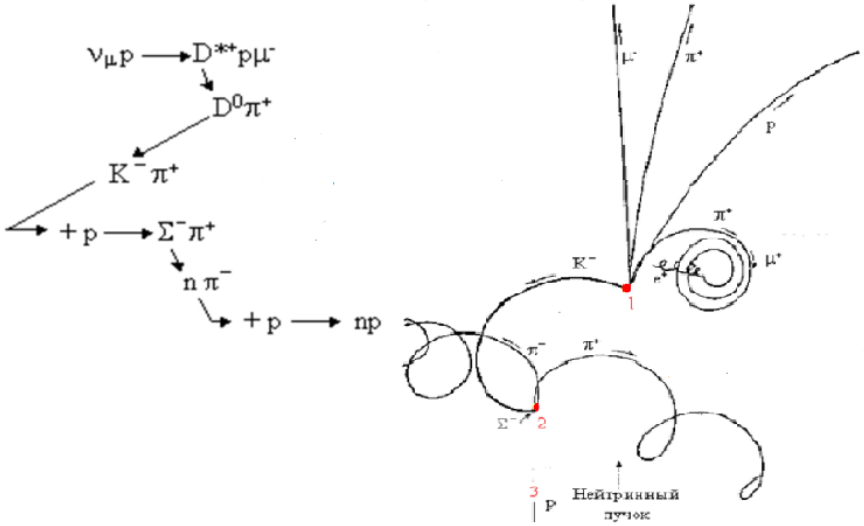


Рисунок 45. Распад D частицы**

Частица D^{**} живет очень короткое время, превращается в D^0 мезон и π^+. В этой же точке, так как время жизни маленькое, он распался на K^- мезон, а π^+ пошел дальше. Дальше в пузырьковой камере π^+ мезон образует след, распадается на μ^+мезон (масса π^+ больше, чем масса μ^+), поэтому эта частица сильнее начинает закручиваться в магнитном поле камеры. Раз μ^+ мезон, значит, будет нейтрино, но нейтрино следов в камере не оставляет. Дальше мю-мезон крутится в камере и распадается на электрон, нейтрино и антинейтрино. Электрон имеет еще меньшую массу, сильно закручивается в поле. Эти две частицы уходят, мы видим электрон. K^- мезон летит в камере, встречает протон, в результате взаимодействия образовалась реакция $\Sigma^-\pi^+$. π^+ вышел из камеры, а нейтрон, который получился, полетел (след его не виден), но он встретил протон, ударил по нему, и мы видим след от протона. Нейтрон провзаимодействовал с протоном, и мы видим нейтрон и протон в конченом состоянии.

Рождение и распад Ω - гиперона.

K^-мезон взаимодействует с протоном и получается Ω^- частица, которая имеет странность, равную (-3), K^+ и K^0 мезоны:

$$K^- + p \rightarrow \Omega^- + K^0 + K^+$$

Далее происходит распад по схеме (Рисунок 138):

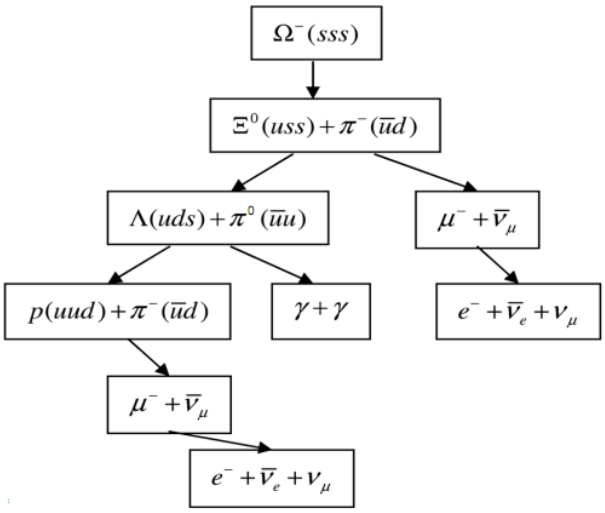


Рисунок 46. Распад сигма-гиперона

Ω^-частица (странность 3) распадается на Ξ^0(uss)-каскадный гиперон, странность изменяется – стало 2 единицы и один кварк u. Далее еще одна странная частица распадается (s кварк превращается в d кварк), получается ud кварки, появляется Λ-частица. Последний s кварк превращает в u кварк, появляется протон и π^-мезон. Интересно, что в точке, где образовалась Λ - частица и π^0 – мезон, мезон распался на 2 γ-кванта, и они родили электрон-позитронную пару. Они по-разному закручиваются в магнитном поле, электрон и позитрон.

Распады K^+ мезона.

Приведем таблицу распадов K^+- мезона (Рисунок 139).

Каналы распада	Относительные вероятности
$\mu^+\nu_\mu$	63.4%
$\pi^+\pi^0$	21.1%
$\pi^+\pi^+\pi^-$	5.6%
$\pi^0 e^+\nu_e$	4.9%
$\pi^0\mu^+\nu_\mu$	3.3%
$\pi^+\pi^0\pi^0$	1.7%
$\mu^+\nu_\mu\gamma$	$5.5\cdot10^{-3}$
$\pi^0\pi^0\gamma$	$2.8\cdot10^{-4}$
$\pi^0 e^+\nu_e\gamma$	$2.7\cdot10^{-4}$
$\pi^+\pi^+\pi^-\gamma$	$1.0\cdot10^{-4}$
$\pi^+\pi^- e^+\nu_e$	$4.1\cdot10^{-5}$
$\pi^0\pi^0 e^+\nu_e$	$2.1\cdot10^{-5}$
$e^+\nu_e$	$1.6\cdot10^{-5}$
$\pi^+\pi^-\mu^+\nu_\mu$	$1.4\cdot10^{-5}$

Рисунок 47. Распады К-мезонов

Разные законы сохранения приводят к тому, что разные вероятности распадов наблюдаются. В 63% случаев распадается на μ^+и ν_μ.

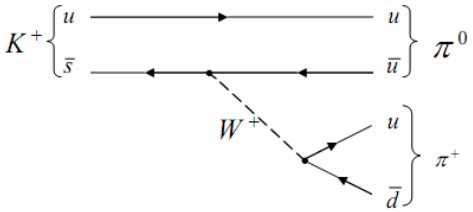


Рисунок 48. Диаграмма распада К+ мезона

K^+ мезон состоит из $u\bar{s}$ кварков (слабый распад) (Рисунок 141), W-бозон превратил $\bar{s}$ кварк в $\bar{u}$ кварк, образовался π^0мезон и W^+бозон, который распадается на $u\bar{d}$, они образовали π^+мезон.

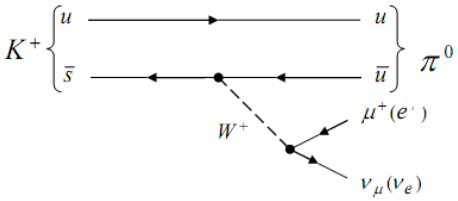


Рисунок 49. Диаграмма распада 1

Дальше $u\bar{s}$ могли схлопнуться (Рисунок 142) и образовать π^+мезон, который потом распался на μ^+ и ν_μ, e^+ и ν_e. На первой картинке W-бозон распадался, а на второй от схлопывания $u\bar{s}$ образовался W-бозон.

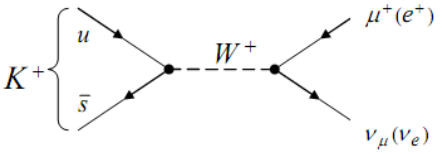


Рисунок 50. Диаграмма распада 2

Хвосты можно поворачивать влево и вправо. Посмотрим еще диаграмму (Рисунок 143).

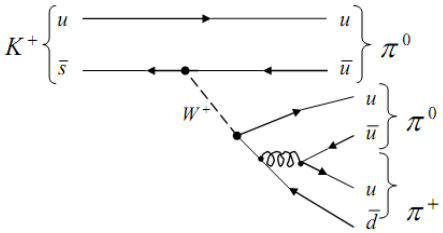


Рисунок 51. Диаграмма распада 3

K^+ мезон состоит из $u\bar{s}$ кварков. $\bar{s}$ превратилось в $\bar{u}$, образовался W- бозон, он распадается на $u\bar{d}$. Кварк $\bar{d}$ за счет сильного взаимодействия родил пару $\bar{u}u$. Образовались π^0, π^0 и π^+.

Распад π -мезона

Мы все время говорим, что пи-мезон распадается на мюон и нейтрино мюонное. Действительно, больше 99% распадается по этому каналу. Дальше непонятное явление. Мы привыкли, что если частица имеет высокую энергию, то ей выгодней распасться на частицу, у которой меньше энергия, бета-распад. π-мезон распадается на мюон и не хочет распадаться на позитрон. Почему?

Распады π – мезонов

Каналы распада π^+-мезона ($\tau = 2.6 \cdot 10^{-8}$ с)

Каналы распада	Относительная вероятность
$\mu^+\nu_\mu$	99.988%
$\mu^+\nu_\mu\gamma$	$2.0 \cdot 10^{-4}$
$e^+\nu_e$	$1.2 \cdot 10^{-4}$
$e^+\nu_e\gamma$	$1.6 \cdot 10^{-7}$
$e^+\nu_e\pi^0$	$1.0 \cdot 10^{-8}$
$e^+\nu_e e^+e^-$	$3.2 \cdot 10^{-9}$
$e^+\nu_e \nu\bar{\nu}$	$< 5 \cdot 10^{-6}$

Каналы распада π^0-мезона ($\tau = 0.84 \cdot 10^{-16}$ с)

Каналы распада	Относительная вероятность
2γ	98.80%
$e^+e^-\gamma$	1.2%
$e^+e^+e^-e^-$	$3.1 \cdot 10^{-5}$
e^+e^-	$6.2 \cdot 10^{-8}$
4γ	$< 2 \cdot 10^{-8}$

Рисунок 52. Распад пи-мезона

Пи-мезоны бывают трех типов: π^+, π^- и π^0.

π^+ мезон (Рисунок 145) состоит из $u\bar{d}$ кварков, в результате кварки аннигилируют, превращаются в W^+-бозон, распадается на μ^+ и ν_μ. Такой распад происходит потому, что пи-мезон обязательно должен кому-то передать свой заряд. А это только 2 частицы, которые заряжены и легче него – мюон и электрон.

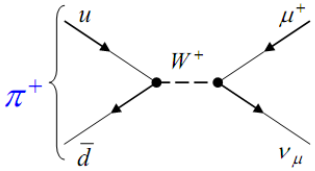


Рисунок 53. Распад Пи+ мезона

π^0 мезон состоит из $u\bar{u} - d\bar{d}$, заряд ноль, ему не нужно искать никакой заряженной частицы, которой предать свой заряд. Он распадается на 2 γ-кванта. Это электромагнитный распад, а в первом случае – слабый. Это приводит к тому, что время жизни $\tau(\pi^{\pm}) = 2{,}6 \cdot 10^{-8}$с , а $\tau(\pi^0) = 0{,}84 \cdot 10^{-16}$с. Электромагнитное взаимодействие

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

быстрее разваливает π^0 мезон. Между слабыми и электромагнитными взаимодействиями разница в 10 порядков.

Спиральность.

Он может распасться (Рисунок 146) на мюон и нейтрино, может распасться на позитрон и нейтрино. В распадах должны выполняться законы сохранения момента количества движения и законы сохранения импульса.

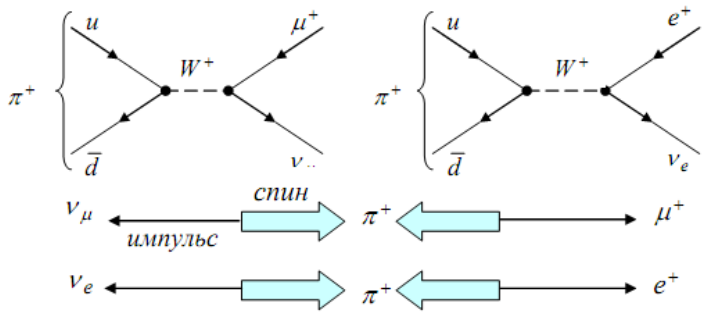


Рисунок 54. Распад π^+ мезона

Нейтрино – это частица, которая движется со скоростью, близкой к скорости света. Если она движется с такой скоростью, то она имеет импульс по направлению своего движения. Нейтрино имеет спин ½, он может быть направлен в двух направлениях. Природа устроена так, что спин частицы, которая образуется в результате слабого взаимодействия (а это нейтрино), направлен против движения частицы. Спин направлен назад, должен выполняться закон сохранения количества движения. Пи-мезон тоже должен иметь спин, направленный назад. Образовался мюон, который имеет определенное направление спина. Но мюон имеет массу, поэтому он двигаться со скоростью света не может. Если мюон обгоняет частица, которая движется со скоростью света, ей кажется, что мюон движется назад, хотя направление спина сохраняется. Понятие спиральности, а это проекция спина на направление движения, это хорошее квантовое число только для частиц, которые движутся со скоростью света. А если нет, то всегда можно ввести понятие, что мы двигаемся в другом направлении, и поэтому спиральность становится не очень хорошим точным квантовым числом. В какой пропорции? В отношении $\frac{v}{c}$: если мы двигаемся со скоростью света, он нас не обгонит, если двигаемся с малой скоростью, то у него больше вероятность обогнать. Поэтому понятие спиральности связано с отношением $\frac{v}{c}$. Если v=c, то спиральность – хорошее число, если v≠c, то пропорционально этой величине и есть.

Распад пи-мезона на электрон и мюон. Энергия электрона будет большая, поэтому он будет двигаться с большой скоростью, и он будет распадаться со спиральностью неправильной, потому что его обогнать тяжелее, а мюон – легче. Поэтому здесь распады происходят с неправильной спиральностью и вероятность того, что масса мюона такая, какая нужна, она работает. В К-мезоне такая же вероятность

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

распада: он скорее распадается на мюоны, а на электроны распадается реже. Потому что в К-мезоне распадается частица, в конечном состоянии она имеет больше энергию электроны, чем мюоны, поэтому они движутся с релятивистской скоростью. Это называется киральностью (хиральностью) – определенное значение проекции – левое, правое.

Частицы, распадающиеся в слабом взаимодействии, имеют спиральность (-1) (они летят так, а спин направлен в другую сторону):

$$h\left(e^{-}, \nu_e, \mu^{-}, \nu_\mu, \tau, \mu_\tau, u, d, s, c, b, t\right) = -1$$

а античастицы имеют спиральность по направлению движения.

$$h\left(e^{+}, \overline{\nu_e}, \mu^{+}, \overline{\nu_\mu}, \tau^{+}, \overline{\nu_\tau}, \bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{b}, \bar{t}\right) = +1$$

Поэтому нейтрино всегда имеет левую поляризацию (h=−1), а антинейтрино – правую (h=+1). Это следует из экспериментальных данных.

Рассмотрим пример: может ли распад $\pi^0 \to \nu_e + \overline{\nu_e}$ для нейтрино с нулевой массой (Рисунок 147)?

По закону сохранения энергии и импульса все это возможно. Импульс направлен в противоположные стороны. Спиральность у нейтрино? Спин должен быть направлен вправа, к антинейтрино тоже вправо. Складывая две половинки, которые направлены в одну сторону, получаем 1. А спин π^0 равен нулю. Не выполняется закон сохранения момента. Такой распад невозможен, хотя энергетически все в порядке.

$$J_i = J_\pi = 0, \qquad J_f = \vec{s}_\nu + \vec{s}_{\bar{\nu}} = 1$$

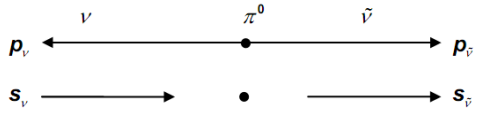


Рисунок 55. Распад для нейтрино с нулевой массой

Законы сохранения.

Есть три типа взаимодействия: сильное, слабое и электромагнитное. В каждом из них выполняются определенные законы сохранения (Рисунок 148).

Наиболее удобное для нас – сильное взаимодействие: сохраняется электрический заряд, энергия, импульс, момент количества движения, квантовые числа, проекция спина, изоспина, барионное число, проекция четности, зарядовая четность, CP-четность, все сохраняется. В электромагнитном взаимодействии не сохраняются изоспин и проекция изоспина. Остальное сохраняется. В слабом взаимодействии величины s, c, b, t не сохраняются. Но существует закон cpt-четности. Часть законов аддитивны, а есть законы мультипликативные (умножение).

Если смотрю, как меняется заряд, C, электрический заряд, то при зеркальном отражении частица должна замениться на античастицу. Но C и P преобразования для нейтрино не выполняются. Потому что нейтрино имеет определенное значение спиральности. Я должен одновременно поменять и заряд электрический, и спин.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Законы сохранения

Характеристика		Взаимодействие		
		сильное	электромагнитное	слабое
Аддитивные законы сохранения				
Электрический заряд	Q	+	+	+
Энергия	E	+	+	+
Импульс		+	+	+
Момент количества движения		+	+	+
Барионный заряд	B	+	+	+
Лептонные заряды	L_e, L_μ, L_τ	+	+	+
Странность	s	+	+	−
Очарование (charm)	c	+	+	−
Bottom	b	+	+	−
Top	t	+	+	−
Изоспин	I	+	−	−
Проекция изоспина	I_3	+	+	−
Мультипликативные законы сохранения				
Пространственная чётность	P	+	+	−
Зарядовая чётность	C	+	+	−
Комбинированная чётность	CP	+	+	−
Обращение времени	T	+	+	−
CPT-инвариантность		+	+	+

Рисунок 56. Законы сохранения в физике

Упругое рассеяние электрона на протоне.

Как устроен протон. Есть 2 способа: что-то на нем рассеивать и пытаться сломать протон. Берем, который имеет энергию E и p (Рисунок 149).

Есть:

- нуклон, ядро,
- фотон, который передает энергию электрон,
-энергия, которая передана ядру,
- импульс, который передан,
- электромагнитная волна
- рассеянная волна.

Сечение взаимодействия (Рисунок 189) будет определяться тем, как налетающая частица будет взаимодействовать с каждым элементом, которые находятся внутри протона. Исходим из того, что внутри протона есть какие-то частицы, я по ним суммирую и строю представления: однородный ли протон, неоднородный. Главное, что имеем падающую волну и рассеянную волну.

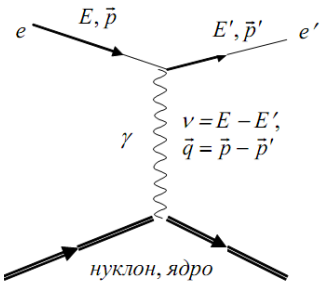


Рисунок 57. Упругое рассеяние электрона на протоне

Что спрятано внутри протона, заключено в этом члене, $\rho(r)$, – это распределение электрического заряда внутри протона, распределение магнитного момента внутри протона, электромагнитная волна, которая с ним взаимодействует.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |M_0|^2 \left| \sum_n \Delta e_n \cdot e^{i\frac{\vec{q}\vec{r}_n}{\hbar}} \right|^2 = \frac{d\sigma_M}{d\Omega} \left| \frac{1}{Ze} \int \rho(\vec{r}) e^{i\frac{\vec{q}\vec{r}}{\hbar}} dV \right|^2$$

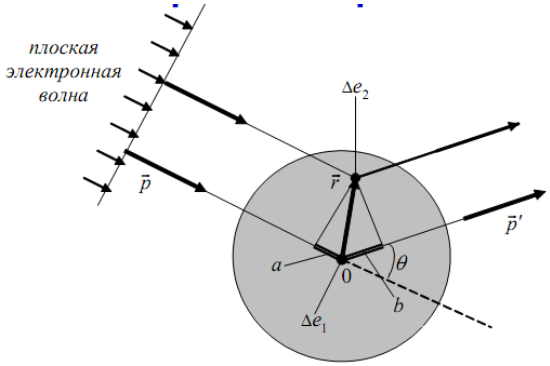


Рисунок 58. Механизм рассеяния электронов на распределенном заряде.

Размер протона – 0,8 Фм. Размер нейтрона приблизительно такой же.
Распределение электрического заряда и магнитного момента протона:

$$\langle r_E^2 \rangle^{1/2}_p = (0{,}86 \pm 0{,}01)\text{Фм}$$

$$\langle r_M^2 \rangle^{1/2}_p = (0{,}86 \pm 0{,}06)\text{Фм}$$

Распределение электрического заряда и магнитного момента нейтрона:

$$\langle r_E^2 \rangle^{1/2}_n = (0{,}10 \pm 0{,}01)\text{Фм}$$

$$\langle r_M^2 \rangle^{1/2}_n = (0{,}89 \pm 0{,}07)\text{Фм}$$

Распределение магнитного момента примерно совпадет, а распределение электрического заряда отличается. Это связано с тем, что и протон, и нейтрон, состоят из u и d кварков, а эти частицы заряженные. Ближе к центру нейтрон имеет положительный заряд, а на периферии – отрицательный.

Размеры протона и нейтрона.

Формула Резерфорда:

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

$$\left.\frac{d\sigma}{d\Omega}\right|_{\text{Мотт}} = \left(\frac{e^2}{2\varepsilon}\right)^2 \frac{1}{sin^4\frac{\theta}{2}} \cdot \frac{cos^2\frac{\theta}{2}}{1+\frac{2\varepsilon}{mc^2}sin^2\frac{\theta}{2}}$$

Но этой формулой нельзя воспользоваться. В этой формуле частица со спином 0 налетала на массивное ядро золота. Поэтому отдачи ядро золота не имело, и спины никакой роли не играли. Здесь наличие спина у протона и электрона приводит к появлению $(\sin\frac{\theta}{2})^2$ и это характеризует отдачу. Это приводит к тому, что формула Резерфорда превращается в формулу Мотта. Но пока что я считаю протон точечным.

Размер протона вводим через формфакторы - факторы формы. Они описывают распределение электрического заряда и магнитного заряда.

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{экс}} = \left[\frac{G_E^2(q^2)+bG_M^2(q^2)}{1+b} + 2bG_M^2 tg^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Мотт}}$$

$$b = \frac{-q^2}{4m^2c^2},$$

q- четырехимпульс, который электрон передает нуклону, m – масса нуклона, θ - угол рассеяния электрона, $G_E^2(q^2)$, $G_M^2(q^2)$ - электрический и магнитный формфакторы. Для протона и нейтрона $G_E^2(0)$ и $G_M^2(0)$ имеют значения:
$G_E^p(0) = 1$? $G_E^n(0) = 0$,$G_M^p = 2{,}79$, $G_M^n = -1{,}9$ (минус - потому что у нейтрона спин и магнитный момент направлены в противоположные стороны, а у протона – в одну).

Глубоконеупругое рассеяние электрона на протоне.

Изучаем, как происходит распределение рассеяние электронов на протоне. Электрон налетает на протон. Если не изменил ничего внутри протона (упругое рассеяние), то он передаст энергию протону и полетит куда-то. Он потеряет часть энергии, и полетит, имея меньшую энергию, - пик упругого рассеяния (Рисунок 151).

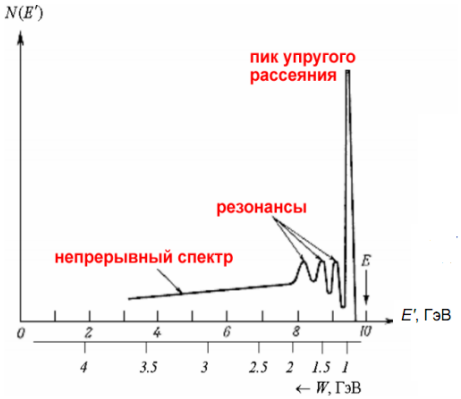


Рисунок 59. Схематический спектр электронов, рассеянных на протоне

Дальше я вижу, что наряду с пиком появляются резонансы. Это те самые Δ - резонансы. Это возбужденное состояние протона, по мере того как энергия

уменьшается (уходит на протон). Все больше и больше происходит возбуждение протона, и резонансы перекрываются. Имеем картинку без резонансов, плато. Посмотрим, как меняется упругое рассеяние в зависимости от импульса, который передают протону (Рисунок 152).

Сечение резонансов не меняется. В опыте Резерфорда тоже не менялось. Это значит, что внутри протона есть какие-то точечные частицы, которые, когда налетает электрон, он передает импульс фотону, фотон взаимодействует с этой частицей, видит эту частицу, и передает энергию и импульс не всему протону, а только отдельной части внутри этого протона. Это важный момент. Если имеем большую длину волны налетающей частицы (энергия маленькая), то для меня протон – он как шарик размера 0,8 Фм. По мере того, как уменьшаю длину волны, я вижу все более тонкие эффекты внутри протона. Фейнман назвал эти частички, которые находятся внутри протона, партонами – частичками протона. Что это за частички?

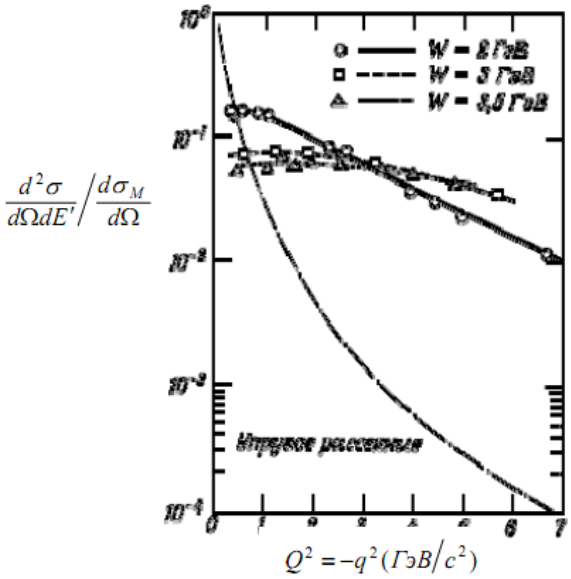


Рисунок 60. Зависимость упругого рассеяния от импульса электрона

Структура протона.

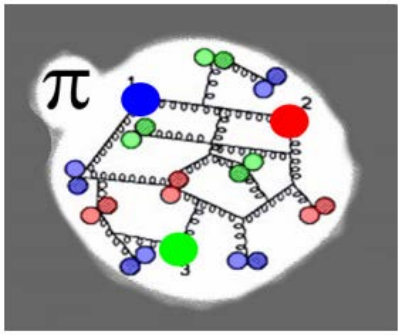


Рисунок 61. Структура протона.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Протон состоит из трех кварков (зеленый, синий, красный), которые делают протон бесцветным. Эти кварки взаимодействуют между собой посредством глюонов (пружинки на рисунке (Рисунок 153)). Внутри протона обнаружены точечноподобные объекты, в которых сосредоточена вся масса нуклона. Размер партона $< 10^{-12}$см. Сегодня мы считаем, что кварки – это точечные частицы.

Заряженные партоны имеют характеристики кварков - их спин ½, а заряды в единицах e либо +2/3, либо -1/3. Вырвать кварк из протона нельзя. Пытаемся, к примеру, вырвать синий кварк, он проявляется в виде π-мезона. На большом расстоянии от протона (порядка Фм) появляется частица π-мезон. На других расстояниях будут другие мезоны.

Если взаимодействуют протон и нейтрон, они обмениваются π-мезонами. Нейтрон испустил π-мезон и превратился в протон, протон поглотил π-мезон и превратился в нейтрон. Так же могут взаимодействовать путем обмена π^0-мезоном. Они обязательно нужны, потому что если имеется 2 нейтрона, то с помощью π^--мезона я его описать не могу, мне нужна такая же частица, такой же массы, но нейтральная. π^0-мезон был предсказан и обнаружен.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Лекция 9. Атомные ядра

Атомная единица массы. Дефект массы.

Когда говорим об атомных ядрах, основная характеристика – это масса атомного ядра. Масса атомного ядра складывается из масс протона и нейтрона. Нужно выбрать единицу измерения, ясно, что не в кг и не в г измерять. За единицу берется одна атомная единица массы (а.е.м.) – 1/12 массы ^{12}C. Имеем $1\ \text{а. е. м.} = 1{,}6582 \cdot 10^{-24}$г или $E = mc^2 = 931{,}44$ МэВ.

Можно составить разность, которая называется дефектом массы, но я не люблю с этой величиной работать: $\Delta = \frac{\text{M}}{\frac{1}{12}M(^{12}C)} - A$.

Энергия связи ядра

Проще работать с другой величиной – энергия связи ядра. Имеется ядро, которое состоит из Z- протонов и N-нейтронов. Или Z и A. Оно имеет какую-то массу. Добавляем энергию. Минимальная энергия, которая нужна, чтобы развалить ядра на отдельные протоны и нейтроны, называется энергией связи.

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

Это энергия, которая нужна, чтобы развалить систему на отдельные протоны и нейтроны. Это величина большая. Поэтому удобнее говорить о другой величине.

Берем протон и нейтрон, складываем их, получаем дейтрон. При этом выделяется энергия 2,2 МэВ.

$$p + n \to d + \gamma(2{,}2\ \text{МэВ})$$

Если из четырех протонов сделаем ядро ^4He, а это делает Солнце, для того, чтобы выполнялись законы сохранения заряда нужно добавить 2 позитрона, если добавлю их, то для того, чтобы выполнялся закон сохранения лептонного заряда, нужно добавить 2 нейтрино:

$$4p \to {}^4He + 2e^+ + 2\nu_e$$

4 протона объединяются, получается ^4He. Эта реакция протекает на Солнце, за один акт выделяется 25 МэВ энергии. Это реакция, за счет которой греется Солнце, оно предает эту энергию нам.

Чтобы развалить гелий на протон и нейтрон, нужно затратить 25 МэВ.

Удобнее говорить об удельной энергии связи ядра: энергию связи ядра делим на массовое число:

$$\varepsilon(A,Z) = \frac{W(A,Z)}{A}$$

Есть атомное ядро. Представьте себе, что атомное ядро – это шарик, который имеет радиус r, внутри шарика находятся протоны и нейтроны. Мы знаем, что радиус действия ядерных сил порядка 1,3 Фм. Это означает, что взаимодействуют только соседние нуклоны. Поэтому полная энергия взаимодействия будет пропорциональна массовому числу: сколько нуклонов, таково и взаимодействие. Если это шарик, то

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

часть нуклонов будет находиться на поверхности, поэтому энергия взаимодействия будет ослабляться за счет того, что часть нуклонов находятся на поверхности, и у них нет соседей на периферии. Эта величина будет пропорциональна площади поверхности: если поверхность r, то $A^{2/3}$. Имеются протоны внутри ядра. Они пытаются из ядра выскочить, взаимодействуют между собой, расталкиваясь. Они ослабляют энергию связи. В члене стоит Z(Z-1) потому, что радиус кулоновское взаимодействие имеет бесконечный радиус действия, протон взаимодействует с каждым протоном внутри ядра. Ядерное взаимодействие – каждый нуклон взаимодействует со своим соседом, поэтому (A-2Z). Делаются еще добавки, которые следуют из того, что атомному ядру выгодно, чтобы все протоны и нейтроны сидели на нижних уровнях, чтобы система в целом имела минимальную энергию. Поэтому, чем сильнее число протонов отличается от числа нейтронов, тем слабее будет связь в атомном ядре, этот член мы тоже вычитаем. Еще один эффект связан с тем, что, когда имеем 2 тождественные частицы, 2 протона и 2 нейтрона, они складываются так, чтобы спины были направлены в противоположные стороны, потому что взаимодействие зависит от спина. Это приводит к тому, что все четно-четные ядра имеют большую энергию связи (34 МэВ), нечетные ядра имеют 0, нечетно-нечетные ядра имеют (-34 МэВ), т.е. наиболее сильно связаны ядра, которые имеют четное число протонов и нейтронов. Получаем формулу Бете-Вайцзеккера:

$$W(A,Z) = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - \delta \frac{(A-2Z)^2}{A} + \zeta A^{-3/4},$$

где $\alpha = 15{,}6$ МэВ, $\beta = 17{,}2$ МэВ, $\gamma = 0{,}72$ МэВ, $\delta = 23{,}6$ МэВ
ζ=+34 МэВ – четно-четные ядра, ζ=0 – нечетные ядра, ζ=-34 МэВ – нечетно-нечетные ядра

Рассмотрим удельную энергию, отнесенную к атомному числу.

Объемная энергия – константа, вычитается поверхностная энергия (чем меньше размер ядра, тем большую роль будет играть поверхность, поэтому поверхностная энергия увеличивается), кулоновская энергия увеличивается с Z, красное – член энергии симметрии. Если просуммировать все это, то получим такую кривую.

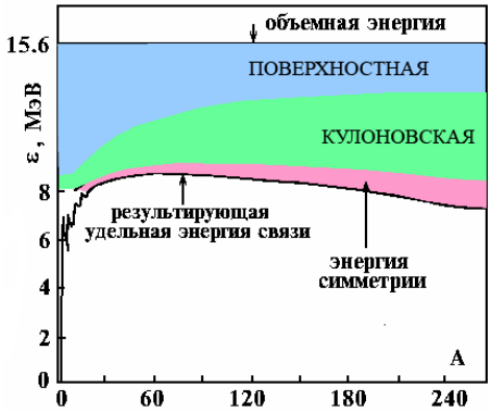


Рисунок 154. Удельная энергия, отнесенная к A

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Посмотрим более внимательно на зависимость удельной энергии связи от массового числа A (Рисунок 155).

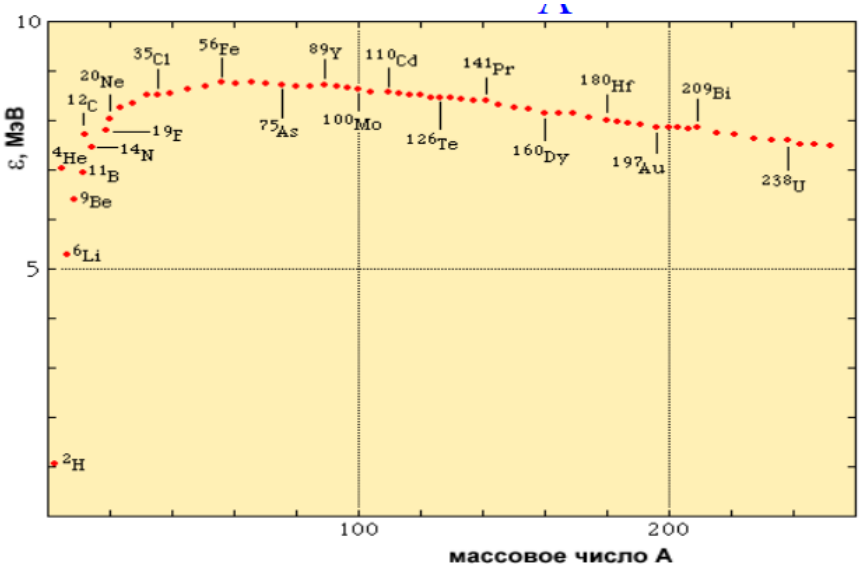


Рисунок 155. Зависимость удельной энергии связи от массового числа A.

Дейтрон, 2,2 МэВ. Если разделить пополам, ведь надо делить на 2, то получите примерно 1 МэВ. Энергия связи увеличивается, достигает максимума в районе железа и дальше спадает. Это увеличение связано с тем, что работает поверхностная энергия, а спад связан с тем, что работает кулоновская энергия. За счет этого наиболее сильносвязанные ядра оказываются в районе железо-никель. Если мы это ядро (тяжелое) превращаем в это ядро (более легкое), то мы получаем избыточную энергию, она выделяется в ядерных реакторах, когда мы делим ядро на 2 более мелких осколка, масса меньше, выделяется энергия.

Солнце их двух протонов образует дейтрон, потом ^{4}He, за счет этого выделяется энергия. Энергия синтеза.

Максимум кривой соответствует примерно 8 МэВ. Удельная энергия связи для большинства ядер составляет 8 МэВ. Поэтому, если хотите в голове прикинуть, какая энергия нужна, чтобы разрушить ядро ^{40}Ca, вы берете 8*40, получаете 320 МэВ. Такая энергия мне понадобится, чтобы разделить ядро ^{40}Ca на отдельные протоны и нейтроны.

Магические числа.

По формуле Бете-Вайцзеккера можно считать энергию связи ядра. Но энергию связи ядра можно определить, зная массу протона и нейтрона. То есть нужно измерить массы атомных ядер. Это можно сделать на масс-спектрометрах (в магнитном поле поворачиваем и измеряем массы ядер). Берем экспериментальные данные по массам атомных ядер, берем то, что дает формула Вайцзеккера. Видим следующее (Рисунок 156):

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

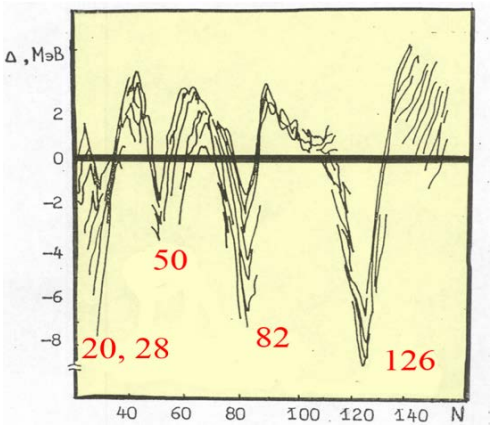


Рисунок 156. Разность между экспериментальными данными и данными по формуле Вайцзеккера

В области нуля стандартные отклонения идут вниз, потом вверх, снова вниз, вверх, вниз и т.д. С одной стороны, отклонение по вертикали составляет 8 МэВ, а масса ядра (число нейтронов 120, это примерно 200 нуклонов) 200*8=1600, а ошибка в формуле Вайцзеккера – 8. Ошибка – 1/200. С такой точностью простая формула смогла описать массы ядер. Но одновременно видим, что если бы разбросы болтались вокруг нуля, то это так себя ведут атомные ядра. Но видим, что тут систематические отклонения. Атомное ядро – это не есть радиус ядра, заполненный протонами и нейтронами, протоны и нейтроны находятся на оболочках (оболочечная модель ядра).

Какие орбиты в ядре? Радиус самого тяжелого ядра – 6-8 Фм. Размер нуклона – 1Фм. Они довольно плотно упакованы. Как они могут крутиться? Тем более, независимо друг от друга. На первый план выходит то, что ничего нигде не крутится. Атомные ядра находятся в определенных состояниях, которые характеризуются квантовыми числами. И атом, и атомное ядро характеризуются атомными числами. Эти квантовые числа определяют, как внутри квантового ядра будут располагаться нуклоны – протоны и нейтроны.

Аналогично в атоме в квантовом представлении. Есть ядро, которое создает потенциал, в котором находятся состояния. Сколько частиц будет находиться в данном состоянии, определяет принцип Паули, потому что эти частицы – фермионы.

Энергия отделения нуклона, α – частицы

Есть начальное ядро, от которого должны отнять массу нейтрона либо через энергию связи. $(A, Z) \rightarrow (A-1, Z) + n$

Энергия отделения нейтронов определяется разностью масс начального ядра и конечных продуктов (конечного ядра и нейтрона) в энергетическиъ единицах:

$$B_n = [M(A-1, Z) + m_n - M(A, Z)]c^2 = W(A, Z) - W(A-1, Z)$$

Энергия отделения протона: $(A, Z) \rightarrow (A-1, Z-1) + p$

$$B_p = \left[M(A-1, Z-1) + m_p - M(A, Z)\right]c^2 = W(A, Z) - W(A-1, Z-1)$$

Атомные ядра перестают существовать, когда $B_n < 0$ и $B_p < 0$.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Знаем, что есть β-распад, α-распад, γ-переходы. α-распад происходит потому, что появляется дополнительная энергия связи за счет энергии связи α-частицы. Поэтому из ядра легко вытащить α-частицу, потому что это дополнительно связанная система. А эта величина составляет примерно 25 МэВ.

$$B_\alpha = W(A,Z) - W(A-4,Z-2) - W(4,Z)$$

Размер ядра

Рассмотрим ядро α - частицы.

По оси X отложен размер ядра, по оси Y– распределение плотности в зависимости от радиуса (расстояния от центра) (Рисунок 157).

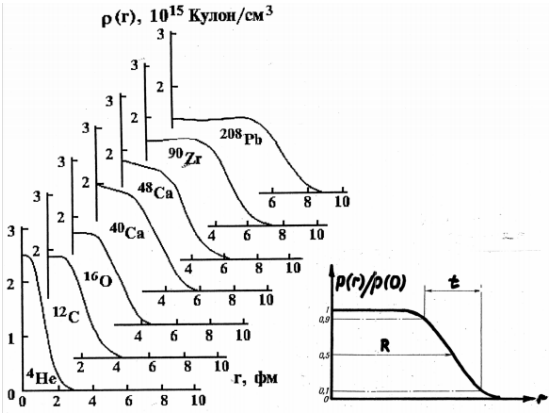


Рисунок 157. Зависимость размера ядра от плотности в зависимости от радиуса

^4He - ступенька, далее увеличиваем массовое число – увеличивается ступенька, ^{40}Ca еще больше ступенька. Плотность распределения материи определяется формулой

$$(r) = \frac{\rho(0)}{1 + e^{\frac{r-R}{a}}}$$

$\rho(0)$ – плотность в центре. Плотность не сильно меняется от одного ядра к другому, плотность ядерной материи оказывается одинаковой.

a – величина, которая определяет спад. Две величины определяют размер атомного ядра: это радиус атомного ядра - расстояние, на котором плотность материи увеличивается в 2 раза, и спад – расстояние, на котором плотность ядерной материи уменьшается от 0,9 до 0,1.Во всех ядрах (совсем легкие ядра не берем, типа водород, гелий) величина спада составляет примерно 2,5 Фм. Он примерно одинаковый. По мере того, как мы идем в сторону увеличения А, увеличивается радиус ядра. Радиус описывается простой формулой: $R = 1{,}2 \cdot A^{1/3}$ Фм. С Увеличением А увеличивается радиус атомного ядра: чем тяжелее ядро, тем больше будет радиус атомного ядра.

Возьмем тяжелое ядро с А=240. Радиус будет примерно 7-8 Фм. Радиус нуклона – 1 Фм. Они плотно упакованы.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Ядерный потенциал

Создадим простейшую модель, чтобы удержать нуклоны в ядре. Нуклоны – шарики. Если положу на поверхность, они покатятся, не смогу их удержать. Чтобы их удержать, нужно сделать ямку. Делаю ямку и складываю туда нуклоны. Классическая аналогия – потенциальная яма, в которую складываются нуклоны. Какую яму, какой потенциал взять? (Рисунок 158)

Если ядра имеют большое массовое число, то у них плоская часть большая, и я могу взять потенциал прямоугольной ямы:

$$V_{\text{пя}}(r) = \begin{cases} -V_0, r \le R, \\ 0, r \ge R \end{cases}$$

Если ядра легкие, то проще взять потенциал гармонического осциллятора.

$$V_{\text{осц}}(r) = -V_0 + \frac{1}{2} M\omega^2 r^2$$

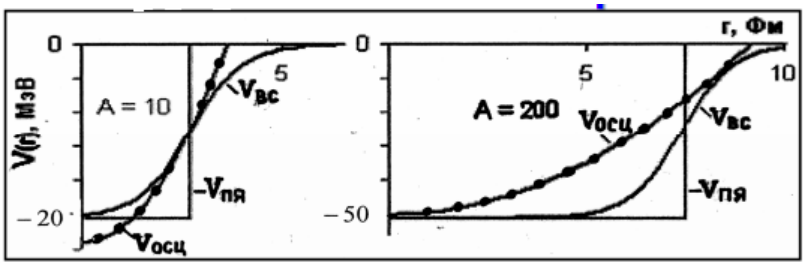


Рисунок 158. Потенциальная яма и гармонический осциллятор

Можно взять более тяжелый случай, он ближе к эксперименту: считать, что потенциал будет вести себя так же, как плотность распределения нуклонов в ядре. Это потенциал Вудса-Саксона:

$$V_{\text{вс}} = \frac{V_0}{1 + e^{\frac{r-R}{a}}}$$

Когда не было вычислительных машин, проще было взять первые два потенциала и для них аналитически решить задачу. Гармонический осциллятор и прямоугольная яма. По мере появления компьютеров, вставили туда более реалистичный потенциал Вудса-Саксона, начали получать результаты.

Посмотрим на потенциал. Он сферически симметричный. Нужно решать уравнение Шредингера:

$$\hat{\hat{H}}\psi = E\psi$$

Это гамильтониан, который описывает взаимодействие нуклонов в ядре.

$$\left\{\frac{d^2}{dr^2} - \frac{L(L+1)}{r^2} + \frac{2m}{\hbar^2}[E - V(r)]\right\}\psi(r) = 0$$

Оно зависит от потенциала взаимодействия $V(r)$ и орбитального момента движения нуклона в ядре.

В прямоугольной потенциальной яме: уровень 1s – уровень, на котором орбитальный момент количества движения l=0. Второй уровень с l=0 – это уровень 1p и

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

так далее. Уровень с p=1, второй p-уровень и т.д. Это уровни, на которых будут располагаться нуклоны.

Если потенциал гармонического осциллятора, то последовательность уровней другая. 1s, 2s , 2s и 1d совпали. По-другому ведут себя уровни.

Возьмем ядро, оно создало кулоновский потенциал. В нем находятся электроны. Они ведут себя так: уровень 1s, уровень 2s совпадает по энергии с 2p, дальше уровни 3,4,5 s, p,d уровни и так далее. В гармоническом осцилляторе уровни находятся на одном и том же уровне. Это называется вырождением.

Рисунок 159. Одночастичные состояния ядер

Магические числа

Дальше берем частицы, сажаем на уровни и должны получить магические уровни. На первом уровне могу посадить 2 частицы, на втором уровне могу посадить еще 6 частиц, на третий – 20. Получили 3 магических числа. Дальше – 40. Не получилось. Тут наблюдается различие между одной моделью и другой. 18, 20 совпало, 34 откуда-то возникло (потому что уровни расщеплены).

Если написать более аккуратно потенциал взаимодействия двух нуклонов, то он будет иметь такой вид. Он зависит от ямы, в которую мы его помещаем, центральную яму (гармонический осциллятор, либо потенциальная яма, либо потенциал Вудса-Саксона). Взаимодействие зависит от спинов нуклонов, от того, как направлены спины нуклонов относительно вектора, который соединяет между собой нуклоны (вектор $\vec{n}$, который соединяет нуклоны), зависит от того, как направлен орбитальный момент нуклона относительно спина:

$$V = V_1(r) + V_2(r)(\vec{s_1}\vec{s_2}) + V_3(r)(\vec{s_1}\vec{n})(\vec{s_2}\vec{n}) + V_4(r)(\vec{L}\vec{s})$$

Представим, что нуклоны – 2 заряженных шарика. Между ними будет центральное взаимодействие, потенциал взаимодействия $\frac{q_1 q_2}{r}$. Это первый член в потенциале. Теперь взял шарики и закрутил, вокруг них образовалось магнитное поле, значит, они дополнительно между собой взаимодействуют. Если поля направлены в

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

одну сторону, одно взаимодействие, если в разные, то другое, если один шарик находится здесь или здесь, то другое взаимодействие, и вот они, эти члены. Взял один шарик и кручу вокруг другого, шарик будет создавать свое собственное поле, будет спин шарика (он крутится, находясь на месте), будет орбитальный ток, и опять взаимодействие будет другое.

Если возьмем заряженные шарики, то простая вещь, электродинамика, сосчитаем, как между собой будут эти шарики взаимодействовать, то выяснится, что это не закон Кулона, а более сложная формула, в которой нужно учесть магнитные моменты этих шариков, как они крутятся и т.д. Но протоны – это не шарики, которые крутятся, но они имеют свои квантовые числа, спины, орбитальные моменты и т.д.

Мы будем иметь потенциальную яму, в которой расположены уровни. На помощь приходит принцип Паули, на этих уровнях размещаем нуклоны (Рисунок 160).

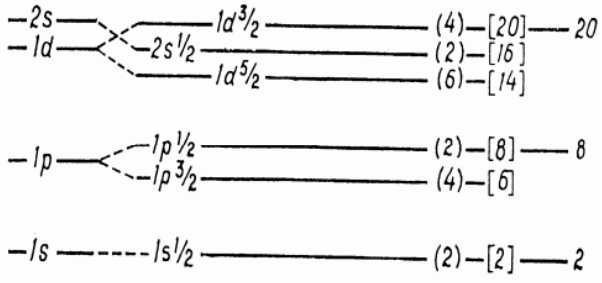


Рисунок 160. Модель оболочек

На первом уровне будет 2 нуклона, на втором – 6 частиц. Эти числа появляются из-за того, что спин нуклона складывается из орбитального момента и собственного спина. l=1_ к ней добавляю ½, получаю ½ и 3/2. Если ½, то буде 2 проекции: 1/2 и (-1/2). Если 3/2, то будет 4 проекции: 3/2, ½, (-3/2), (-1/2). Больше никаких нуклонов посадить туда не могу. Получили первые 2 магических числа. Дальше сажаю 20 частиц, получаю третье магическое число. Тот потенциал дал расщепление уровней 5/2, 7/2, он опустился ниже и дал мне магическое число 28. Второй уровень дал магическое число 50. Таким образом, спин-орбитальное расщепление уровней привело к тому, что мы правильно описываем все магические числа.

Мы создали 2 модели атомного ядра: капельная модель ядра и оболочечная модель ядра.

Магическое число – это такое число, которое соответствует полностью заполненной оболочке. В этом случае ядро имеет сферически-симметричную форму. В этом случае состояние характеризуют следующие числа $|nljj_z\rangle$, где l- орбитальный момент, j-полный момент, j_z- проекция.

Эти четыре числа характеризуют расположение нуклонов на оболочках.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Спин ядра J

Ясно, что ядро имеет значение спина. Он будет складываться из спинов отдельных нуклонов. Спины нуклонов состоят из собственного спина, а это ½, и орбитального момента.

Полный момент количества движения будет определяться суммой полных моментов всех нуклонов нутрии ядра:

$$\vec{J} = \overrightarrow{s_1} + \overrightarrow{s_2} + \cdots + \overrightarrow{s_A} + \overrightarrow{l_1} + \overrightarrow{l_2} + \cdots \overrightarrow{l_A} = \overrightarrow{J_1} + \overrightarrow{J_2} + \cdots + \overrightarrow{J_A}$$

Для спинов атомных ядер выполняются закономерности:

- если ядро четное, то $J = n$ (n=0,1,2,3…), J – целое.

Целое или полуцелое будет определяться квантовым числом ½. Если четное число половинок, то четное число.

- если А нечетное, то J=n+1/2 – полуцелое.

Четно-четные ядра в основном состоянии имеют J=0.

Имеем ядро, над которым движутся 2 нуклона. Один движется так, имеет спин j_z направленный в одну сторону, а второй движется по той же самой орбите, но так, что его спин j_z направлен в противоположную сторону. Ядерные силы – это силы притяжения. Они максимальны, когда орбиты нуклонов максимально перекрываются. На такую перекрывающуюся орбиту можно посадить только 2 частицы, которые имеют j_z=1/2 и $j_z = -1/2$. Поэтому эти половинки приводят к тому, что появляется 3/2,-3/2, 5/2, -5/2, 7/2, -7/2. Так происходит заполнение нуклонных оболочек.

Четность ядра P

Каждое состояние в ядре описывается волновой функцией. Волновая функция определяет четность атомного ядра. Оператор четности действует на волновую функцию.

$$\hat{P}\psi = p\psi$$

Четность атомного ядра определяется орбитальными моментами каждой частицы и ее собственной внутренней четностью:

$$P = \pi_i p_i = \pi_i \cdot (-1)^{l_i}$$

где π_i - внутренняя четность нуклона.

Внутренняя четность протонов и нейтронов (+1). Она берется из того, что кварки имеют четность, равную (+1), протоны состоят из кварков, поэтому три кварка дают четность, равную (+1), и четность ядерного состояния будет определяться значением орбитальных моментов нуклонов, оболочками, на которых они сидят:

$$P = (-1)^{l_1}(-1)^{l_2} \cdots (-1)^{L_A} = (-1)^{\sum_\alpha l_\alpha}$$

Силы спаривания

Если состояние ядра (Рисунок 217) $1P_{3/2}$, то значения j_zмогут быть +1/2, -1/2, +3/2, -3/2. Складывая все это, получаем полный спин равный нулю, $J^p = 0^+$, ноль – это j, а (+) потому, что четность положительная.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

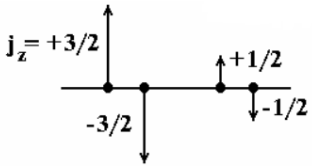


Рисунок 161. Возможные значения спинов.

Квадрупольный момент ядра

Атомное ядро имеет сферическую форму. Нуклон, когда проходит над этой точкой ядра, он изменяет форму, подтягивает его, и в результате движения ядро перестает быть сферически-симметричным (Рисунок 162), оно вытягивается, нуклон его вытягивает.

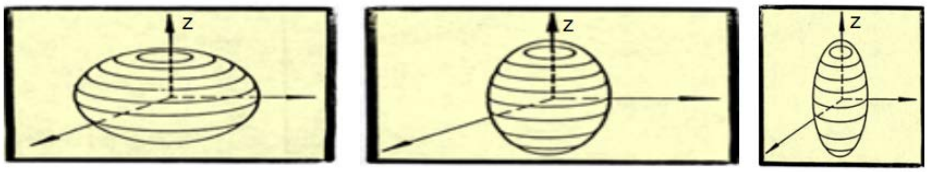


Рисунок 162. Квадрупольный момент ядра

Ядро будет иметь форму, отличную от сферически-симметричной потому, что над заполненным кором (а кор соответствует магическому числу) висят нуклоны, которые будут ядро деформировать. Это определяет распределение электрического заряда в ядре.

Квадрупольный момент ядра определяется как плотность ядерной материи и симметрии относительно оси Z:

$$Q_0 = \frac{1}{e}\int \rho(r)(3z^2 - r^2)\, dV$$

Квадрупольный момент может быть положительным или отрицательным. Это внутренний квадрупольный момент. Если мы будем находиться верхом на ядре, то будем видеть Q_0. Если будем со стороны смотреть на ядро, оно имеет квантовые флюктуации, крутится в пространстве, мы будем наблюдать внешний наблюдаемый квадрупольный момент.

$$Q = \frac{J(2J-1)}{(J+1)\cdot(2J+3)}Q_0$$

Спины, которые имеет ядро, определяют отличие внутреннего квадрупольного момента от внешнего.

Внешние нуклоны приводят к тому, что появляется форма ядра, отличная от сферически-симметричной. Максимальной она должна быть между магическими числами (Рисунок 163).

Возьмем магическое число, равное 20 – ноль и пульсация. То же самое на 50 – ноль и пульсация. Идем дальше – магическое число 82: ноль и отличие. Дальше 126:

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

ноль и отличие. Таким образом, простейшая модель (нуклоны, находящиеся над остовом сферически-симметричным, приводят к его деформации) работает.

Рисунок 163. Квадрупольные моменты ядер.

Форма ядра

Рассмотрим ядро ^{186}Pb (Рисунок 164). В основном состоянии оно имеет спин 0, четность положительная, оно кругленькое. Возбужденное состояние при энергии 0,5 МэВ, оно превращается в чечевичку. Еще поднимаю энергию, в состояниях $0^+, 2^+, 4^+, 6^+$ превращается в вытянутый эллипс. В зависимости от того, какая энергия, в каком состоянии находится, ядро меняет свою форму.

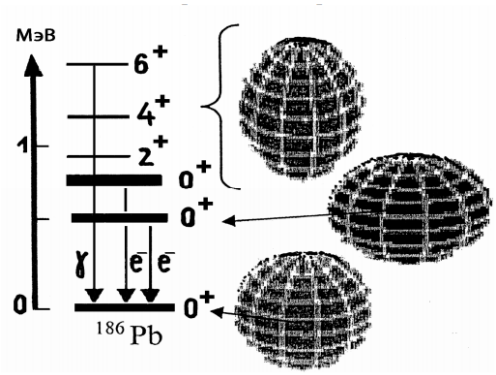


Рисунок 164. Форма ядра

Если имеем сферическое ядро, то нуклон крутится над ним и видит его как сферу. Поэтому он будет видеть одно и то же, разные энергии видеть не будет. Это будет сферический потенциал, один, второй третий, четвертый. Теперь возьмем ядро в вытянутое состояние. Один нуклон, который крутится, будет видеть один потенциал, нуклон, который крутится вот так, видит другой потенциал. Чем отличаются эти нуклоны? Тем, что они имеют разные проекции орбитального момента. И ядро они будут видеть по-разному, потенциалы взаимодействия будут разными. Раз другой потенциал, то уровни сдвигаются. Уровень $P_{3/2}$ имеет проекции +3/2, +1/2, если

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

деформация положительная. Если деформация отрицательная, то, с другой стороны, смещение. В деформированном потенциале уровни ядра расщепляются в зависимости от проекции j_z. Так и должно быть. Эта модель была создана Нильсоном. Потенциал Нильсона:

$$V_{\text{Нильс}}(\vec{r}) = \frac{1}{2}M\left(\omega_{xy}^2(x^2+y^2)+\omega_z^2 z^2\right) + \vec{C}\overrightarrow{ls} + D\overrightarrow{l^2}$$

XY имеют одну частоту колебаний, по z другая частота

Ядерные оболочки зависят от того, какую форму имеет ядро. Если ядро – вытянутый эллипсоид, то происходит расщепление сферически-симметричных уровней в этом потенциале, если ядро сплюснутое, то происходит расщепление уровней в этом потенциале.

Возбужденное состояние ядра

Основное состояние ядра – состояние с минимальной энергией. Все уровни в нем, самые низшие состояния заполнены, все свободные состояния – свободны. Есть граничная энергия, энергия Ферми, выше которой уровни свободны, ниже – все заполнено. Это основное состояние ядра.

Если говорить об оболочечной модели ядра, то основное состояние выглядит так: на первом уровне сидят 2 частицы (характеризуются энергией E_1), на втором - 4 частицы (характеризуются энергией E_2). Каждый уровень характеризуется спином J_1 и J_2 и четностью.

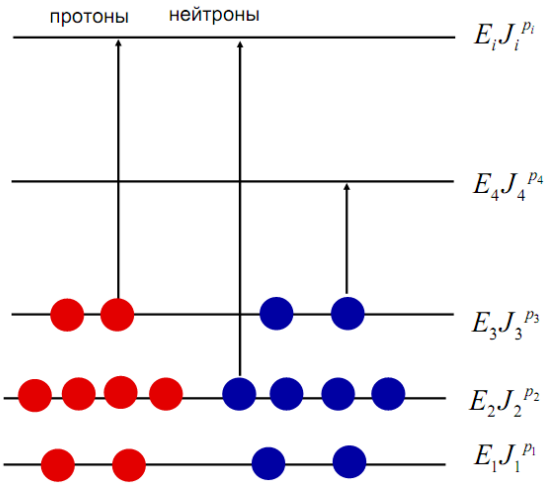


Рисунок 165. Одночастичные возбуждения ядра.

Возбужденное состояние ядра возникнет, если взять протон и пересадить на другой, более высокий, уровень. Чем выше уровень, тем выше энергия возбуждения. Аналогично с нейтронами. Можно взять 2 частицы и пересадить на другой уровень.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Колебательные состояния сферических ядер

Ядро одновременно можно описывать как жидкую сферически-симметричную каплю. Она может принимать такие формы (Рисунок 166):

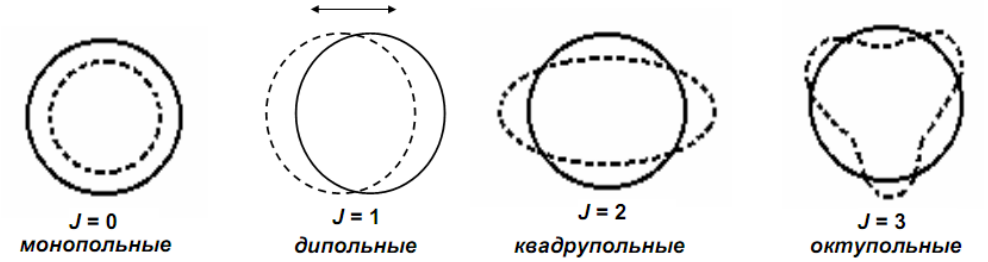


Рисунок 166. Колебательные состояния сферических ядер

Это колебания. Каплю можно сжать, но жидкость несжимаема, она сжимается, но очень большое усилие нужно приложить. Аналогично с ядром. Ядро остается сферическим, но вы его сжимаете. Они располагаются при очень высоких энергиях. На ядро можно бросить электромагнитную волну, она может взаимодействовать с протонами (с нейтрона не взаимодействует, так как нет заряда), они смещаются, нейтроны тоже (потому что центр тяжести должен сохраниться) и начинаются колебания протонов относительно нейтронов. Форма не меняется, внутри ядра колеблются протоны и нейтроны. Это дипольные колебания.

Ядро – это очень сложная система. Для того, чтобы что-то понять, нужно делать приближения. Мы считаем, что наиболее легко сделать квадрупольные колебания. Посмотрим, увидим мы их или нет. В квадрупольных колебаниях могут быть 1 фонон, 2 фонона, 3 фонона, все это усложняется.

Колебательные состояния сферических ядер

Рассмотрим в идеальном случае квадрупольные колебания сферического ядра (Рисунок 167). Это основное состояние, поэтому квадрупольный фонон поэтому 2. Он при какой-то энергии находится.

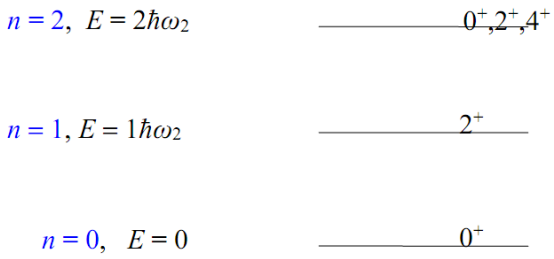


Рисунок 167. Спектр квадрупольных колебаний четно-четных ядер

Если 2 фонона, то они должны находиться при большей энергии. Спины будут такие: 2+2 будет 0, 1,2,3,4 в зависимости от того, как эти двойки расположены. Но в ядре существуют симметрии, поэтому, когда у вас квадрупольные колебания, то спины 1,3 исчезают, получается первый уровень 2, второй уровень 0,2,4. Связано с ядерными

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

симметриями. То есть должен быть один уровень и три уровня при вдвое большей энергии.

Рассмотрим ядро палладия. Уровень при энергии 0, 512 МэВ – один квадрупольный фонон, два квадрупольных фонона – мы должны цифры умножить на 2 – 1,127 МэВ, 1,133 МэВ и 1,229 МэВ. Рядом находятся 3 уровня – 0,2,4, два квадрупольных фонона. Все прекрасно объяснили. В ядре квадрупольные колебания могут быть. Когда берем 3 квадрупольных фонона, то начинается каша, потому что там начинаются ангармоничные колебания, это приводит к тому, что наблюдается целая группа уровней.

Вращательные состояния деформированных ядер

Есть деформированное ядро. Появляется постоянная Планка, квантовое число J, с которым колеблется ядро, и орбитальный момент ядра.

$$E_{\text{класс}} = \frac{L^2}{2\Im}, \qquad E_{\text{вращ}} = \frac{\hbar^2}{2\Im} J(J+1)$$

L- вращательный момент, $\Im$- момент инерции ядра.

Если ядро имеет форму, отличную от сферического ядра, оно может так крутится.

Рассмотрим ядро гафний 180. Имеем 0,2,4,6,8. Если пользоваться формулой, то она даст следующее: 311 (эксперимент 309), 653 (эксперимент 642), 1120 (эксперимент 1085) МэВ.

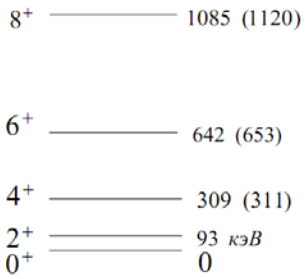


Рисунок 168. Вращательные состояния ядра гафния

Экспериментальный спектр получается потрясающе близкий к тому, что дает простейшая модель.

Вращательные спектры бесспиновых ядер

Рассмотрим 2 ядра: плутоний 242 и плутоний 244 (Z одно и то же, число нейтронов на 2 больше). J от 0 до 26. Сравним цифры этих двух ядер (Рисунок 169).

Цифры одинаковые. 306-318,1084-1114, 4172 - 4135 МэВ. Несмотря на то, что имеют разное число нуклонов, имеют форму примерно одинаковую и вращаются одинаково вплоть до больших моментов. Это можно измерить по переходам с уровня 26 на 24, по мере того как спускаемся, энергии будут уменьшаться. Измеряя спектры, получаем представление о том, какое ядро и что там происходит.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

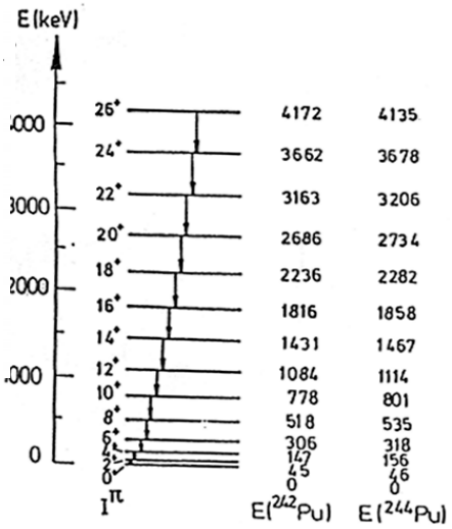


Рисунок 169. Вращательные спектры бесспиновых ядер

Если имеете эллипс, он весь крутится в твердом теле. Ядро слегка деформированное. Сферическая часть не крутится, а по сферической части крутится избыток частиц. Эта нашлепка крутится по сверхпроводящему ядру.

Возбужденные состояния 2^+

Мы говорили, что в колебательных спектрах низшее состояние равно 2^+, во вращательных спектрах низшее состояние 2^+. Возьмем одночастичную модель. Есть протон и нейтрон на уровне ${}^{3}/_{2}{}^{-}$ (Рисунок 170).

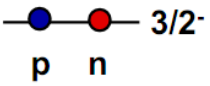


Рисунок 170. Протон и нейтрон

Чему будет равен спин этого ядра?

$$\vec{J} = \frac{\vec{3}}{2} + \frac{\vec{3}}{2} = 0,1,2,3$$

Среди всех этих состояний будет двойка. Возьмем двойку, про 0,1 забываем. Берем разные ядра, во всех ядрах беру энергию первой 2^+.

Сперва посмотрим на пример (Рисунок 171).

Сравним энергию уровней никеля (62 нуклона) и олова (118 нуклонов). Состояния 0, 2 и т.д. Состояние 2 – энергии 1,172 и 1,23 МэВ. Уровни очень близки. Хоть ядра и разные, но в них имеет такие колебательные спектры.

Еще пример: ядро гафния и урана. Аналогичная ситуация.

Можно взять ядра, посмотреть, как идут уровни, и обнаружить, что у большого числа ядер уровни видите, это подтверждает, что ядра могут колебаться, вращаться и т.д.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Рисунок 171 Возбужденные состояния 2+

Рассмотрим зависимость энергии состоянии 2^+от массового числа.

Почему энергия лезет вверх? Потому что это магические числа. Они ни колебаться, ни вращаться не могут. Поэтому 2^+ — это одночастичное состояние, которое находится при очень большой энергии. Дальше смотрите, магические число N=82, N=126, такой провал, все 2^+ низко расположены. Это говорит о том, что та модель, которую я предложил (есть сферическое ядро, над которым навешиваем нуклоны, с ростом числа нуклонов деформация растет, при очень большом числе нуклонов над оболочкой, деформация увеличивается, и ядро проще крутить, чем сферическое), она хорошо описывает свойства атомных ядер.

Изоспин атомного ядра

Изоспин ядра может принимать значения от A=(+1/2) (потому что каждый нуклон имеет спин ½, если умножим его на число нуклонов A, получим A/2). Начиная с (N-Z)/2, потому что изоспин определяется разностью между числом протонов и нейтронов. Имеем минимальное и максимальное значение спина:

$$\left|\frac{Z-N}{2}\right| \leq I \leq \frac{A}{2}$$

В основном состоянии ядро имеет минимальное значение спина:

$$I_{gs} = |I_3| = \left|\frac{Z-N}{2}\right|$$

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Аналоговые состояния ядер лития и бериллия

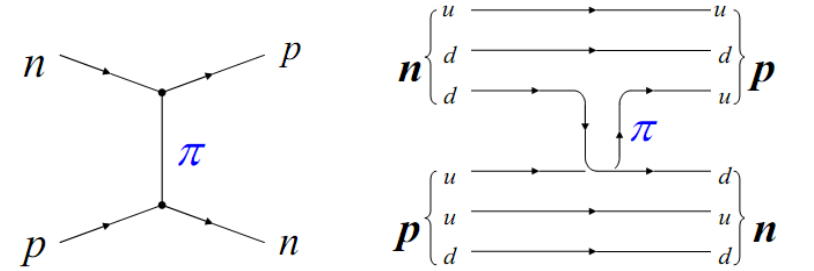
Все время говорим, что ядерные силы не зависят от заряда ядра. Протон с протоном взаимодействуют через ядерное взаимодействие, так же, как и протон с нейтроном, как нейтрон с нейтроном. Возьмем 2 ядра: ^{7}Li и ^{7}Be. 3 протона, 4 нейтрона и зеркальное ядро – 4 протона и 3 нейтрона. Возбужденные состояния: $3/2^{-}$, $1/2^{-}$, 7/2 – обратите внимание на энергию. Уровни похожи. Это связано с тем, что все будет определяться ядерным взаимодействием и не зависеть от кулоновского взаимодействия. Но кулоновское взаимодействие есть, и оно сдвигает на ΔE. Если мы опустим все на величину кулоновского взаимодействия, то увидим, что 3 протона и 4 нейтрона взаимодействуют так же, как 4 протона и 3 нейтрона. Такие пары можем составить и убедиться. Такие состояния называются аналоговыми состояниями в атомных ядрах. Они определяются разным значением изоспинов.

Обобщенная модель ядра

Есть модель, которая описывает ядро как капельку жидкости, есть нуклоны, которые движутся. Теперь надо все это объединить. Это называется обобщенная модель ядра. В ядре могут быть колебания, в этих колебаниях могут участвовать основная масса ядра, а одночастичные нуклоны в ней могут переходить с одной оболочки на другую. Это и есть обобщенная модель ядра, которая была развита Бором и Моттельсоном.

π-мезоны, кванты ядерного поля

Есть 2 нуклона. Они между собой взаимодействуют – обмениваются мезонами (как сказал Юкава). Протон (Рисунок 172) испускает π^{+}мезон, превращается в нейтрон, нейтрон его поглощает и превращается в протон.



Однопионное *np*-взаимодействие Кварковая диаграмма *np*-взаимодействия

Рисунок 172. np-взаимодействие

Если говорить на кварковом уровне, то протон состоит из uud кварков, нейтрон - из udd кварков. d кварк перешел сюда, и стал нейтроном, u кварк перешел сюда, и нейтрон стал протоном.

Потенциал ядерный взаимодействия нуклонов - на расстоянии 1,5 Фм.

Подставляем в формулу: $m_{\pi}c^{2} = \frac{\hbar c}{R} \approx \frac{200\ \text{МэВ}\cdot\text{Фм}}{1{,}5\ \text{Фм}} \approx 130\ \text{МэВ}$

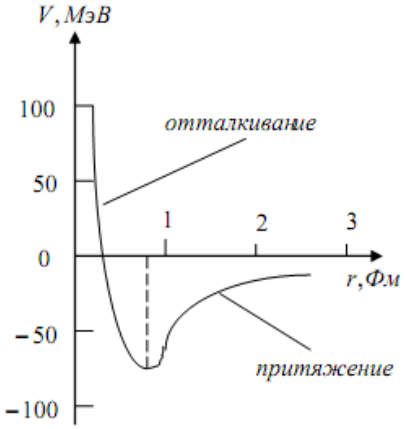
КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Масса π- мезона должна быть 130 МэВ. Он не был известен, Юкава сказал, что надо искать. Тогда частиц было известно мало. Обнаружили, оказалось, что обнаружили мюон. Но потом нашли и пи-мезон, он имеет энергию, как предсказал Юкава. Модель правильная.

Ядерное взаимодействие – это обмен ми-мезонами.

Потенциал Юкавы

Выглядит так (Рисунок 173):



Радиальная зависимость нуклон-нуклонного потенциала

Рисунок 173. Потенциал Юкавы

$$V(r) = g_N \frac{e^{-\frac{r}{a}}}{r}$$

где $a = \frac{\hbar}{mc}$, $g_N -$ ядерный заряд нуклона.

Диаграммы N-N взаимодействий

Кроме π - мезонов, были открыты другие мезоны. Спины разных типов мезонов:

мезон	π	η	ρ	ω
$J^P(I)$	$0^-(1)$	$0^-(0)$	$1^-(1)$	$1^-(0)$

π-мезон имеет массу 140 МэВ, η-мезон имеет массу 549 МэВ.

ρ-мезон и ω-мезон имеют спин 1.

Это приводит к тому, что, когда частицы, нейтрон и протон, обмениваются частицей с изоспином 0, это приводит к притяжению. Но, по мере того как они приближаются друг к другу, у них ядерная энергия взаимодействия увеличивается, взаимодействие рождает ρ-мезон и ω-мезон, а они имеют спин, равный 1, и начинают нуклоны расталкивать. Если бы в природе существовали только π - мезоны и ω-мезон, то нуклоны должны были бы схлопнуться в точку, ядерные силы их бы стянули. Как только они подходят на достаточно маленькое расстояние, в дело вступают эти 2 мезона и они приводят к

тому, что протон и нейтрон отталкиваются. Поэтому протон и нейтрон находятся на расстоянии примерно 1,5 Фм.

Кластеры в легких ядрах

Ядро — это жидкая капля, внутри находятся протоны, нейтроны. Потом есть оболочки, на них находится определенное число нуклонов. Но нуклоны могут образовывать кластеры в ядрах (Рисунок 174).

Рисунок 174. Кластеры в легких ядрах

Ядро бериллия 8 – это 4 протона, 4 нейтрона. Это две альфа-частицы, 2 протона и 2 нейтрона образовали альфа-частицу, они не связаны между собой. Они из ядра выскакивают. Время жизни ядра бериллия 8 - 10^{-16}с. Вы существуете потому, что за это время к ядру бериллия сумела присоединиться еще одна альфа-частица, и образовалось ядро ^{12}C. ^{9}Be сумел присоединить еще один нейтрон, он сумел эти 2 альфа-частицы связать между собой, и это стабильное ядро, не разваливается.

Экзотические ядра. Антиядра. Гиперядра

Экзотические ядра – это ядра, которые могут быть сильно перегруженные протонами и нейтронами, внутри атомного ядра могут находиться гипероны (это гиперядра). Существуют ядра, которые состоят из антипротона и антинейтрона, антидейтерий, антигелий, существуют антиатомы. Антиатом водорода был открыт. Их свойства абсолютно похожи: что у водорода, что у антиводорода.

Лекция 10. Радиоактивность

N-Z диаграмма атомных ядер

На диаграмме каждому ядру соответствует точка (Рисунок 175). По оси X отложено число нейтронов в ядре, по оси Y – число протонов Z. Черные точки посередине – это стабильные ядра, а голубые, фиолетовые, желтые – ядра радиоактивные.

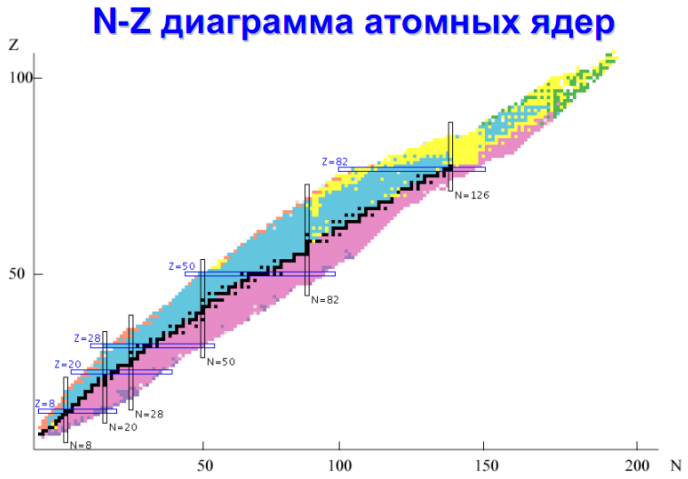


Рисунок 175. N-Z диаграмма атомных ядер

Радиоактивность

Радиоактивность – это свойство атомных ядер самопроизвольно изменять свой состав в результате испускания частиц или ядерных фрагментов. «Испускает частицы или ядерные фрагменты» - испускаются γ-кванты, электроны, позитроны, нейтрино, α-частицы, ядро ^{13}C, сера 32, и, наконец, явление, когда ядро самопроизвольно разделяется на 2 фрагмента. Уран 238 разделился так, что один кусок 138, второй 100.

Радиоактивный распад

К нему относятся:

- α-распад – испускание ядрами α - частиц (ядро гелия),
- β-распад – испускание (или поглощение) лептонов,
- γ-распад – испускание γ - квантов,
- Спонтанное деление – распад ядра на два осколка сравнимой массы.

Более редкие распады – это испускание ядрами ^{12}C и ^{32}S

Во всех распадах изменяется состав ядра – число протонов Z, массовое число A или и то, и другое одновременно.

Для того, чтобы что-то распалось, нужно, чтобы масса покоя в начале была больше масс покоя того, что получилось в конце: $M_i > \sum M_f$. Это закон сохранения энергии. Если возьмете массу, умножите на c^2 (M_i - масса начального состояния

(initial), M_f- масса конечного состояния), то получите массу покоя. Энергия покоя в начале должна быть больше энергии покоя частиц в конце.

Разность в массах идет в виде энергии продуктов распада.

$$Q = \left(M_i - \sum M_f\right) c^2$$

Вот было ядро А, оно распалось, получилось (А-4), оно полетело влево, а α-частица – вправо. Закон сохранения энергии выполнился.

Это необходимое условие, чтобы происходил распад. Но не достаточное. Потому что могут быть еще законы сохранения, которые запрещают этот распад. Например, закон сохранения четности, момента количества движения и т.д.

Почему что-то распадается? Дело в отношении неопределенности. Ядро – это не мертвая система, которая застабилизировалась. Там постоянно происходят процессы: нейтроны превращаются в протоны, протоны превращаются в нейтроны, между протонами и нейтронами бегают π-мезоны. Возьмите энергию покоя ядра (это А*900 МэВ – энергия покоя нуклонов), энергии распада – 10-15 МэВ.

Постоянная распада λ

Если возьмем N ядер, то вероятность того, что распадется за малый интервал времени dt число ядер dN, будет определяться числом ядер, которое мы имеем в данный момент, временем, в течение которого мы данный процесс наблюдаем, и вероятностью распада:

$$N = -\lambda N dt$$

где λ - постоянная распада в единицу времени. Чем больше ядер, тем больше распадется, чем больше вероятность, тем больше распадется, чем дольше буду наблюдать, тем больше распадется. Знак «-» потому, что в процессе наблюдения число ядер уменьшается.

Закон радиоактивного распада

Если записать это в интегральном виде, то будем иметь:

N(t) – число ядер, оставшихся в источнике в момент времени t. В начальный момент времени было N(0), прошло время t, и число ядер, которое осталось:

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

Столько ядер мы будем наблюдать, ведь обычно смотрим не на ядра в источнике, они распадаются, и мы видим, сколько распадов произошло. Число распавшихся ядер – есть число ядер в начальный момент минус сколько ядер распалось:

$$N_0 - N(t) = N_0\left(1 - e^{-\lambda t}\right)$$

Можем ввести 2 понятия. Среднее время жизни τ: по определению среднего:

$$\tau = \frac{\int_0^\infty t \left|\frac{dN}{dt}\right| dt}{\int_0^\infty \left|\frac{dN}{dt}\right| dt}$$

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Среднее время жизни – это количество ядер,которое распалось за время τ. А время τ - это время, в точение которого число ядер уменьшается в e раз (e=2,7). Можем взять время, в течение которого число ядер уменьшается в 2 раза. Это более удобная величина:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = \frac{ln2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda} = \tau \cdot ln2$$

Это период полураспада.

Есть 3 константы: постоянная распада, среднее время жизни и период полураспада. Таким простым соотношением они связаны между собой.

Допустим, период полураспада у меня час. Число радиоактивных ядер 1000. За час распадется 500 ядер. Но на самом деле, не 500, а процесс статистический: может распасться 498 или 520 и т. д. Это процесс вероятностный. Потому что λ – вероятность распада. Но для оценок всегда можно взять 500 через час, еще через час – 250, или примерно 240-260. Удобная величина для оценки.

α-распад

α-распад – это распад атомных ядер, сопровождающийся испусканием $\alpha -$ частицы (ядра ^4He). Он происходит в результате сильного взаимодействия. Мы знаем, что в результате сильного взаимодействия распадаются элементарные частицы. Время распада элементарной частицы в результате сильного взаимодействия $\sim 10^{-23} - 10^{-24}$с. А тут время распада в пределах: для ядра вольфрама – $T_{1/2}(^{182}_{74}W) > 8{,}3 \cdot 10^8$ лет, $T_{1/2}(^{219}_{91}Pa) = 5{,}3 \cdot 10^{-8} c$. Почему такой диапазон? Здесь работает новое явление – прохождение α-частиц через потенциальный барьер.

Чтобы происходил распад ядра с испусканием α-частицы нужно, чтобы выполнялось условие:

$$M(A,Z) > M(A-4, Z-2) + M_\alpha$$

M(A,Z) –масса исходного ядра
$M(A-4, Z-2)$- масса конечного ядра
M_α- масса α-частицы
В результате распада будет выделяться энергия:

$$Q_\alpha = [M(A,Z) - M(A-4, Z-2) - M_\alpha]c^2$$

α-распад – это двухчастичный процесс. Есть тяжелое ядро, оно распалось. В одну сторону полетело ядро, в другую - α-частица. Импульс ядра должен быть равен импульсу частицы. Так как масса ядра гораздо больше массы частицы, то основную энергию заберет α-частица.

$$T_\alpha = Q_\alpha \frac{M(A-4, Z-2)}{M(A-4, Z-2) + M_\alpha}$$

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

T_α- кинетическая энергия частицы. α-частица уносит 98% энергии α-распада. Вы с точностью до 2% говорите, что энергия α-распада 5МэВ, α-частица уносит 5 МэВ. Рассмотрим зависимость энергии α-частицы от числа нейтронов в исходном ядре (разные изотопы) (Рисунок 176).

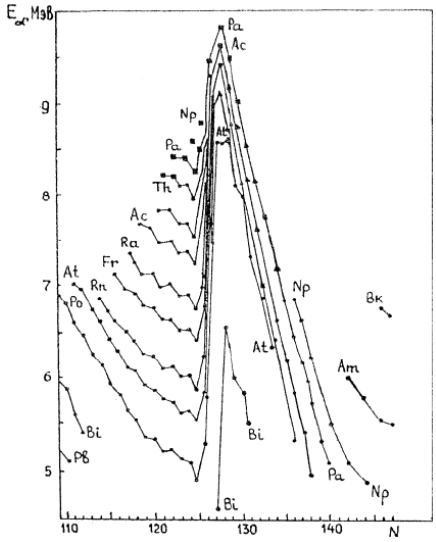


Рисунок 176. Энергии альфа-частицы в зависимости от числа нейтронов ядра

Наблюдается максимум при массовом числе примерно 130. Почему разные ядра имеют один максимум? Это связано с тем, что во всех случаях образуется α-частица, которая является дважды магическим ядром: 2 протона, 2 нейтрона, оболочка 1s заполнена. Энергия связи α-частицы 28 МэВ. Поэтому α-частица, когда вылетает, она оставляет ядро в сильно возбужденном состоянии, потому что она сильно связана. Энергия связи увеличивается.

На N-Z диаграмме видим желтые языки. Это α-распад. Он наблюдается для тяжелых ядер, большое N и Z.

Прохождение α-частицы через потенциальный барьер

Возьмем α-частицу и ядро (A-4), начинаем приближать эту частицу к ядру. По мере приближения на больших расстояниях ядерные силы не действуют, действуют только кулоновские силы, в данном случае – это отталкивание (заряд α-частицы и ядра положительный), надо затрачивать энергию для того, чтобы приблизить их друг к другу. Как только они коснулись друг друга поверхностями, в действие вступила ядерная сила, ядро (A-4) и α-частица слились в ядро A.

На картинке (Рисунок 176) сближаем ядро, потенциальная энергия растет (область III, II), в этот момент α-частица касается ядра, образовалось A, а α-частица свалилась в этот потенциальный барьер. Она сидит внутри.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

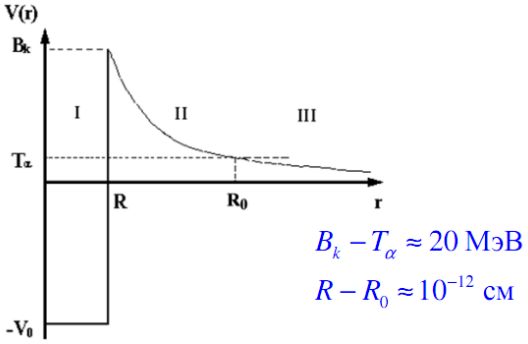


Рисунок 176. Потенциальный барьер.

Нужно сделать обратный процесс. Есть ядро А. Я должен из него образовать α-частицу (внутри ядро разделилось на 2 объекта). Один кусок – это α-частица в ядре, но теперь она уже за счет энергии связи она находится на расстоянии R. Высота барьера составляет 20 МэВ, расстояние, которое должна пройти α-частица 10^{-12}см. Если сосчитать вероятность прохождения α-частицей через барьер, составляет 10^{-36}. Это означает, что частица должна 10^{36} раз удариться о барьер и только в одном случае она через этот барьер пройдет. Но это зависит от того, в каком месте она будет биться.

Вероятность распада определяется тем, как часто α-частица подходит к потенциальному барьеру и вероятностью того, что она пройдет через этот потенциальный барьер. Дадим простейшую оценку тому, как часто α-частица будет подходить к барьеру. Радиус ядра R, частица движется со скоростью v, она вдоль радиуса движется. Оценим скорость α-частицы. Возьмем энергию α-распада 20 МэВ, чтобы не мучиться. Какую энергию должна иметь α-частица, чтобы двигаться со скоростью света? Энергия α-частицы должна быть равна энергии покоя α-частица. Энергия покоя α-частицы 4*1000 (энергия нуклона – ГэВ, 4 нуклона). 20/4000, извлекаем корень, вероятность того, что частица будет двигаться со скоростью V/c будет корень из энергии кинетической, деленной на энергию покоя. Энергия α-частицы будет составлять 2/10 скорости света. С такой скоростью частица находится в ядре, оценочная величина, с такой скоростью она бьется о край ядра. Итак, частица подходит к краю с такой частотой:

$$f = \frac{v}{2R} = \frac{v}{2r_0 A^{1/3}} \approx \frac{c}{2r_0 A^{1/3}} \left[\frac{2(T_\alpha + V(r))}{\mu_\alpha c^2}\right]^{\frac{1}{2}} \approx 10^{21}\text{сек}^{-1}$$

V - скорость α-частицы внутри ядра, $v \approx (0{,}1 - 0{,}2)c$,
T_α- кинетическая энергия α-частицы
μ_α- приведенная масса α-частицы
V(r) – ядерный потенциал ($V_0 \approx 30$ МэВ)
С такой частотой f она будет биться, там коэффициент большой. Она долго бьется, пока из ядра не выскочит.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

α-распад на возбужденные состояния ядра

α-частица, находясь в ядре, имеет определенный момент количества движения. Орбитальный момент количества движения и момент количества движения ядра начального и конечного связаны соотношением:

$$|J_f - J_i| \leq l \leq J_f + J_i$$

J_f, J_i- спины конечного и начального ядер.

Наряду с кулоновской энергией, которая есть, α-частица обладает определенным значением центробежной энергии:

$$E_{\text{ц.б.}} = \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2mr^2}$$

Это момент инерции частицы относительно ядра.

Рассмотрим примеры.

Распад эйнштейния. Спин этого ядра (+7/2). Его основное состояние $(^7/_2)^+$, он распадается на берклий 97 (эйнштейний имеет номер 99). 90% распада идет в основное состояние. Если распад идет на возбужденное состояние, то часть энергии берет ядро, которое находится в возбужденном состоянии. То есть от энергии распада я должен отнять эти энергии, а раз часть энергии остается в ядре, то α-частице труднее проходить через этот потенциальный барьер – барьер становится выше и шире.

Основное состояние имеет спин 7/2. С большой вероятностью тоже идет на 7/2, орбитальный момент 0. Дальше у вас 3/2, 5/2, 9/2, большая разница в спинах, поэтому распад будет идти на это состояние в районе 7/2, 9/2. Роль спина и энергии α-частицы хорошо видна. А еще ярче это видно на другом примере.

Ферми 100 $^{255}_{100}Fm$. Тоже имеет спин 7/2 (потмоу что эти 2 ядра близкие). Ферми распадается на калифорний($^{251}_{98}Cf$). На основное состояние ничего не распадается (0,09%), основной распад идет сюда, потому что там ½, 3/2, 5/2, вот он сюда и распадается. А энергии здесь маленькие – отдала α-частица 100 кэВ ядру, зато ей легче преодолевать потенциальный барьер.

Так как энергия α- распада становится меньше, период полураспада 20 лет. В предыдущем случаем период полураспада был 20 дней (энергия больше).

β-распад

Это такой распад, когда ядро, имеющее массовое число A и число протонов в ядре Z превращается в ядро, которое имеет то же самое массовое число A, но Z либо увеличивается на 1, либо уменьшается на 1.

Имеется стабильное ядро (Рисунок 177). Видим кулоновский барьер у протонов. Протоны - красного цвета, нейтроны – синего. Начинаем увеличивать число нейтронов в ядре. Сажаем их на верхний уровень слева. Это означает, что нейтрон, который туда посажен, может свалиться вправо, у него есть возможность, он превращается в протон, в результате из ядра вылетает электрон и нейтрино. Как только нейтрон сел на самый верхний уровень (пунктирная линия), никакие силы удержать его внутри ядра не могут,

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

он будет выскакивать. Это природа границы атомных ядер. Энергия связи нейтрона на этой линии равна нулю.

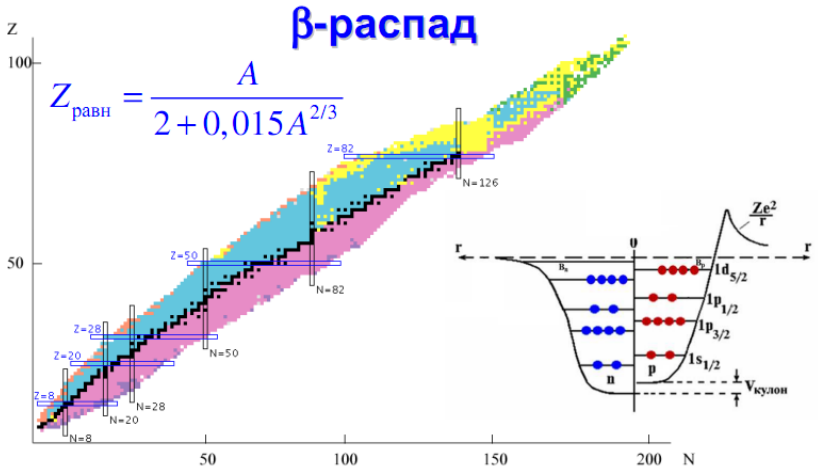


Рисунок 177. Бета-распад

Аналогичная ситуация с протонами. Но протон еще удерживает этот потенциальный барьер. Если буду сажать протоны, то они могут превращаться в нейтроны, тогда будет β^+- распад.

Посмотрим на линию стабильных атомных ядер. Для стабильных атомных ядер Z зависит от атомного числа так: отношение числа протонов к числу нейтронов уменьшается.

$$Z_{\text{равн}} = \frac{A}{2 + 0{,}015A^{2/3}}$$

Линия N=Z, а по мере того, как увеличивается число нейтронов, отношение увеличивается, потому что кулоновские силы пытаются ядро развалить, а когда разбавляем его нейтронами, кулоновская энергия уменьшается. Поэтому для стабильных ядер ядру выгоднее иметь большее количество нейтронов, вот оно и имеет. С увеличением A Z начинает сильнее уменьшаться.

β-распад мы видим, потому что вылетел электрон. Измеряю спектр электронов и обнаруживаем следующее. Спектр непрерывный.

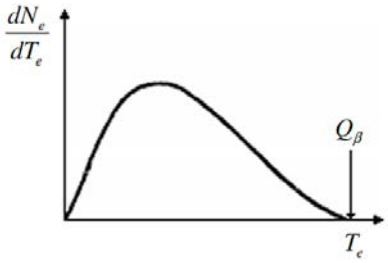


Рисунок 178. Спектр электронов бета-распада

Тут возникает 2 вопроса. Почему спектр электронов непрерывный? Почему он такой?

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

У вас имеется ядро, которое находится в определенном состоянии, его энергия определенная. Происходит распад на вполне определенное состояние. Разность двух чисел должно быть третье число, постоянная. А здесь непрерывный спектр.

Второй вопрос: мы имеем ядро и видим, что из него выскочил электрон. О чем мы должны думать? Мы должны думать, что этот электрон находился внутри ядра, а потом выскочил, как α-распад. Но квантовая физика говорит, что внутри ядра нет электронов. Откуда они там взялись?

Вопросы были решены одним ходом: Паули предположил, что в процессе β-распада наряду с электроном появляется еще одна частица. Эта частица имеет массу, равную нулю, спин, равный половинке, это новая частица.

Можем понять, какие энергии максимальные будут.

$Q_{\beta^-} = [M^я(A,Z) - M^я(A,Z+1) - m_e]c^2$ - β^--распад

$Q_{\beta^+} = [M^я(A,Z) - M^я(A,Z-1) - m_e]c^2$, β^+-распад

Нейтрино имеет массу покоя и энергию покоя равные нулю, нейтрино всегда движется со скоростью света. Это неправильно. В стандартной модели так считается. Сегодня известны опыты по осцилляции нейтрино, которые говорят, что масса нейтрино не ноль, она гораздо меньше, чем эВ. Масса покоя протона – ГэВ, масса покоя электрона – 0,5 МэВ, а здесь меньше 1 эВ. Какая она? У нас есть 3 типа нейтрино: электронное, мюонное и тау. Какое соотношение масс между ними, мы не знаем. Одна из этих частиц может быть стабильной. То есть масса ее может быть ноль или минимальной. Соотношение масс на сегодняшний день мы не знаем. Знаем только, что соотношение такое, что, если все просуммировать эти массы трех нейтрино, это будет меньше 4 эВ. Это фундаментальная проблема на сегодняшний день.

Есть еще одно очень интересное соотношение. Ядро захватывает электроны, ядро находится в шубе из этих электронов. Поэтому между протоном и электроном существует взаимодействие. Но это не кулоновское взаимодействие, к которому мы привыкли, что протон притягивает электрон. Между ними есть такое взаимодействие. Но есть еще и слабое взаимодействие между протоном и электроном. Протон захватывает электрон, протонов стало на 1 меньше, и из ядра вылетает нейтрино. Теперь распад двухчастичный, в начале был атом, в конце ядро и нейтрино, они полетели в разные стороны.

$Q_{e-з} = [M^я(A,Z) + m_e - M^я(A,Z-1)]c^2$, - е –захват.

Как убедиться, что действительно такое явление? Нейтрино очень трудно ловить, редко этот процесс происходит, захват. Очень сложно его увидеть, сечение взаимодействия нейтрино 10^{-44}. Нас выручает, что если протон захватил электрон, то он будет его захватывать из ближайшей оболочки электронной к ядру, это *K*-оболочка, или *l*-оболочка. Образовалась вакансия. Туда будет сваливаться электрон из более высоко расположенной оболочки, будет рентгеновское излучение, либо будет вылетать электрон. Таким образом, наблюдая это явление, можно говорить, что происходит е-захват.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Если имеется не ядро, а атом, то энергии будут такие:

$Q_{\beta^-} = [M^{\text{ат}}(A,Z) - M^{\text{ат}}(A,Z+1)]c^2$, β^- –распад

$Q_{\beta^+} = [M^{\text{ат}}(A,Z) - M^{\text{ат}}(A,Z-1)]c^2 - 2m_e c^2$, β^+- распад

$Q_{\text{е}-\text{з}} = [M^{\text{ат}}(A,Z) - M^{\text{ат}}(A,Z-1)]c^2$, е-захват

$M^{\text{ат}}$ - массы атомов.

Имеется процесс:

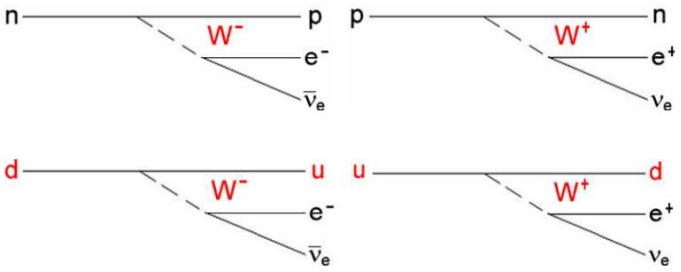


Рисунок 179. Бета-распад

Имеется нейтрон, в результате β-распада он превращается в протон, испускается W-бозон, бозон, который переносит слабое взаимодействие, дальше он распадается на электрон и антинейтрино электронное. В ядре на один нейтрон становится меньше, на один протон становится больше, массовое число не меняется, Z меняется. Либо еще процесс: протон превращается в нейтрон, испускается W^+-бозон, он распадается на позитрон и нейтрино. Это должно соответствовать тому, что сохраняется барионный заряд, поэтому барион превращается в барион, закон сохранения электрического заряда: был 0, стал тут (+1). Чтобы уравновесить, появляется электрон, с зарядами стало все прекрасно. Появился лептон. Чтобы его уравновесить, нужен антилептон – антинейтрино электронное.

На кварковом уровне: d кварк нейтрона превращается в u кварк протона, испускается W-бозон, дальше все повторяется. Ферми сказал: электроны в ядре отсутствуют. Они рождаются в ядре и вылетают из ядра после рождения, так как находиться в ядре не могут. Это есть процесс β-распада. Ферми впервые ввел понятие слабого взаимодействия. Электроны рождаются в результате слабого взаимодействия. Он придумал четырех-фермионное взаимодействие Ферми, потом прошло какое-то время, и мы поняли, что слабое взаимодействие переносится с помощью W-бозона.

Энергии β-распада

Если распадается ^3H на ^3He, электрон и антинейтрино, то энергия в этом распаде 0,02 МэВ.

Если литий превращается в бериллий, то энергия 20 МэВ.

Периоды полураспада изменяются от 10^{-3}с до 10^{16} лет. 10^{16} лет — это на 6 порядков больше, чем время существования Вселенной. Физики пытаются понять периоды β- распада, измерить. Физики сейчас измеряют двойной β-распад, чтобы определить массу нейтрино. А он происходит за время 10^{22} лет. Еще на 6 порядков

больше. Пытаются понять, существует ли распад, когда вылетает 2 электрона, а нейтрино нет. Это означает, что не сохраняются лептонные числа. Пытаются понять, есть ли такой распад. Тут нужны тонны веществ, тонны детекторов, чтобы что-то увидеть и убедить мировую общественность, что вы измерили периоды полураспада.

Если ядро нечетное (Рисунок 180), то так изменяется энергия атомного ядра в зависимости от Z. Видим наиболее сильно связанное ядро, стабильное ядро, радиоактивное ядро. Радиоактивное ядро в результате β- распада скатывается, и ядро становится стабильным.

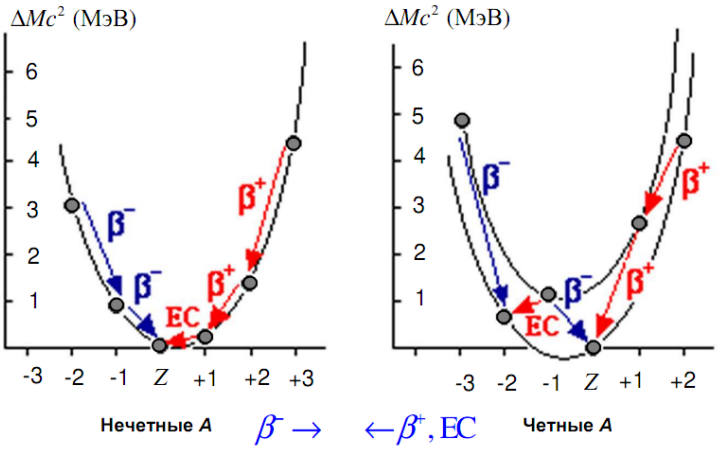


Рисунок 180. Бета-распад ядер

Если ядро четное, то последний член в формуле для энергии – энергия спаривания нуклонов, приводит к тому, что не одна парабола, а две. Поэтому ядро с одной параболы сваливается на другую. И получаются стабильные ядра.

Все определяется массой ядер и потенциальной способностью ядра распадаться.

Остается один очень интересный момент. α-распад – рождается положительно заряженная частицы. Мы говорим, что α-частица должна пройти через потенциальный барьер. β^+-распад – в ядре родился позитрон. Он тоже должен проходить через потенциальный барьер. Мы видим совершенно другие периоды полураспада. Это связано с тем, что α-частица, которая рождается с энергией 4-10 МэВ, она имеет длину волны гораздо меньше, чем размер ядра. Она действительно рождается внутри атомного ядра и должна пройти через потенциальный барьер, границу. А что происходит с нейтрино и электроном? Они тоже имеют энергию порядка 10 МэВ, но масса у них меньше. Поэтому длина волны оказывается большой. Поэтому, когда она рождается, она рождается не внутри ядра, а на гораздо большем объеме, который выходит за пределы потенциального барьера, поэтому у нее нет этого потенциального барьера. Это очень важный момент. Что значит, что частица рождается вне ядра? Это значит, что у нее большой орбитальный момент. А если большой орбитальный момент, как она может родиться вне ядра и одновременно распадается нуклон в ядре? Это и подавляет β-распад. Чем больше l, тем сильнее подавлен β-распад. Это определяет

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

вероятность β-распад, потому что большой орбитальный момент должна унести α-частица, а это означает, что она должна родиться где-то там. Вероятность ее рождения в ядре и где-то на периферии оказывается довольно большой. Она рождается не в точке, а в некоторой области: $\Delta E \cdot \Delta t$, $\Delta p \cdot \Delta x$. Здесь работает соотношение неопределенности. И орбитальный момент подавляет β-распад. Потенциальный барьер подавляет α-распад. Потенциальный барьер не действует на позитрон. На позитрон действует барьер, связанный с орбитальным моментом количества движения.

Рассмотрим пример: распад ядер изобар.

Изобары – это ядра, которые имеют одно и то же массовое число. A=27, три ядра. $^{27}_{12}Mg$ распадается в результате β^--распада, изменяется Z (Z=13), появился алюминий. Здесь $^{27}_{14}Si$ распадается через $\beta^+ -$ распад. У магния орбитальный момент количества движения $(1/2^+)$, спин тоже (+1/2), распадается на 2 возбужденных состояния $^3/_2{}^+$, $^1/_2{}^+$. Вероятность распада около 30% и 70%. Si: спин 5/2, распалось на основное состояние, электрон и позитрон уносят орбитальный момент, равный нулю, поэтому вероятность распада сюда большая, 100% идет в основное состояние.
Для магния энергия β-распада $Q_\beta = 2{,}614$ МэВ, период 9,5 минут. Энергия маленькая и такое время жизни. У Si $Q_\beta = 4{,}81$ МэВ, время распада 4,2 с. Энергия большая, и распад произошел гораздо быстрее. Энергия β-распада будет определяться орбитальным моментом и энергией, которую уносит альфа-частица. Вероятность распада пропорциональна энергии бета-распада: $\lambda \sim Q_\beta{}^5$.

e-захват

Ядро окружено электронной шубой.

$$(A,Z)+e^- \rightarrow (A,Z-1)+\nu_e$$

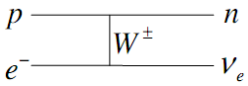


Рисунок 181. e-захват

Ядро (A, Z) взаимодействует с электроном (Рисунок 181). В результате слабого взаимодействия протон превращается в нейтрон (на один протон стало меньше), появляется нейтрино. Протон взаимодействует с электроном в результате слабого взаимодействия $W^\pm$,появляется нейтрон и нейтрино электронное в конечном состоянии.

На правой картинке протон и электрон в начальном состоянии. Бозон записан $W^\pm$, а не W^+ или W^-? Если имеется протон, то он может испустить W^+и превратиться в нейтрон. Электрон может испустить W^-. Рождается квант слабого взаимодействия, W, его может испустить как электрон, так и протон, если рядом находится. Тогда линии идет сюда: электрон родил W^-, превращается в нейтрино. А протон поглотил W^- и превратился в нейтрон.

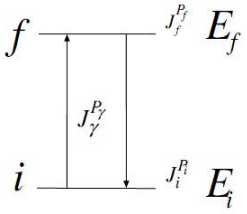
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Имеется ядро, имеется волновая функция протонов, нейтронов, электронов. Они будут превращаться друг в друга, когда сильно перекрываются волновые функции. Это происходит тогда, когда электрон находится ближе к ядру. Поэтому вероятность больше на k-оболочке, на остальных оболочках вероятность меньше.

γ-переходы в ядрах

В α, β-распадах ядро может распадаться из возбужденного и из основного состояния. При γ-распадах возможет распад только из возбужденного состояния.



Квантовые числа фотона

$$J_\gamma = 1$$
$$P_\gamma = -1$$

Рисунок 182. Гамма-переходы в ядрах.

Есть начальное (initial) состояние ядра. Ядро можно возбудить, оно перейдет в состояние f, потом вернется в исходное. Каким образом я буду его возбуждать, поговорим потом. При этом испускается фотон (это частица, которая переносит взаимодействие). Собственный спин фотона 1 (W-бозон имеет спин 1, глюон 1 и фотон 1.). Четность – отрицательная по определению. Должен выполняться закон сохранения количества движения. Есть четность начального состояния, четность конечного состояния. Четность будет определяться произведением четностей начального и конечного состояний. Четность – мультипликативная величина, а спин – векторно складывается. Энергия будет определяться энергией начального состояния, конечного, и энергией, которую уносит фотон.

$$\vec{J_f} = \vec{J_i} + \vec{J_\gamma} \text{ или } |J_i - J_f| \le J_\gamma \le J_i + J_f$$
$$P_f = P_i \cdot P_\gamma \text{ или } P_\gamma = P_i \cdot P_f$$
$$E_f = E_i + E_\gamma + T_R$$

T_R - энергия отдачи ядра.

Если имеется ядро, оно испускает фотон, двухчастичный распад, фотон полетел в одну сторону, ядро – в другую. Какую-то маленькую энергию ядро забирает, это и есть энергия отдачи.

Ядро состоит из протонов и нейтронов. Если протоны перешли на какие-то оболочки, то распределение заряда внутри ядра изменилось. Протон перешел на другую оболочку, плотность распределения заряда в ядре изменилась, значит, изменился заряд. Фотон уносит это распределение электрического момента внутри ядра. Протон и нейтрон обладают магнитными моментами. Если они перешли куда-то, магнитный момент ядра, который суммируется, может изменяться. Этот магнитный момент будет уноситься фотоном. Имеются 2 типа фотонов: фотоны, которые переносят электрическую разность между начальным и конечным состоянием, это

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

электрические фотоны, и магнитные фотоны, которые переносят изменение магнитного момента ядра. Эти фотоны имеют определенное значение спина и четности.

Магнитные и электрические фотоны

Фотон всегда движется со скоростью света. Когда имеете какую-то систему и имеете нуклон, который вылетает, электрон или любую массовую частицу, вы всегда можете ввести понятие орбитального момента и сказать, что полный спин определяется орбитальным моментом количества движения и спиновым моментом. У фотона вы в такую систему координат сесть не можете, фотон всегда движется со скоростью света. Это основной постулат теории относительности. Поэтому фотоны вы не разделяете на l и s. Говорят, что фотоны имеют определенное значение E, определенное значение M, определенное значение спина там и тут. Поэтому, когда я говорю E_1, то это электрический фотон, имеющий спин, равный 1. M_1 - магнитный фотон, имеющий спин 1. M_6 – магнитный фотон, имеющий спин, равный 6. Так классифицируются фотоны.

Имеем соотношения

$l = J, P = (-1)^{J+1}$ - магнитные фотоны MJ

$l = J \pm 1, P = (-1)^{J}$ - электрические фотоны EJ.

Правила отбора по четности:

$P_i P_f = (-1)^J$ для EJ-фотонов.

$P_i P_f = (-1)^{J+1}$ для MJ-фотонов

Есть состояние 1^-.Переходит в 0^+, испускает фотон. Энергия перехода E_1. J=1 в начале, в конце J=0, значит, момент, который уносится фотоном, равен 1. Четность была отрицательная, стала положительной. Имеем электрический фотон E_1.
Если та же самая система, но 1^+, четность не меняется, будет M_1.В третьем случае была 2, стало 0. Момент, который уносится, равен 2. Будет E_2, потому что четность не изменилась. На четвертой картинке четность изменилась, будет M_2.

Фотон так же, как электрон и нейтрино, имеет определенную длину волны. Длина волны фотона гораздо больше ядра, поэтому вероятности распадов будут определяться соотношением между длиной волны фотона и радиусом ядра:

$$\omega(MJ) \sim \frac{1}{\lambda}\left(\frac{R}{\lambda}\right)^{2J+2}$$

$$\omega(EJ) \sim \frac{1}{\lambda}\left(\frac{R}{\lambda}\right)^{2J}$$

Наиболее эффективно в ядре, если вы имеете какое-то возбужденное состояние, происходят E1-переходы наиболее интенсивно, потом M1 переходы, меньше интенсивность E2, M2, потом E3, M3. Чем больший момент уносит фотон, тем меньше вероятность перехода. M-переходы при данной J оказываются подавленными по сравнению с E-переходами. Чем больше J, тем более подавлен переход.

Рассмотрим пример.

Определить спин J, четность P и мультипольность γ-перехода (Рисунок 183).

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

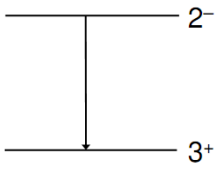


Рисунок 183. Гамма-переход

Начальное состояние 2, конечное 3. Тут (-), там (+). Нужно (2+3)=5. Прибавить векторно будет:

$J = \vec{2} + \vec{3}$=1, 2 ,3 ,4 ,5. Отличие от классической физики в том, что J –целое.

P = (-1)(1) = -1

Имеем E1, M2,E3, M4, E5, Такие фотоны.

Какой переход будет доминировать? Конечно, E1. Остальные будут подавлены.

Изомерные состояния в ядрах

Для электрических и магнитных переходов характерное время жизни – это 10^{-17}-10^{-8} с. Такие электромагнитные переходы происходят быстро. Что будет, если у меня вблизи основного состоянию появится какое-то состояние, между которыми очень большая разность в спинах? Тогда переход должен быть не E1, а M4, M6 .

Ядро индия (Рисунок 184).

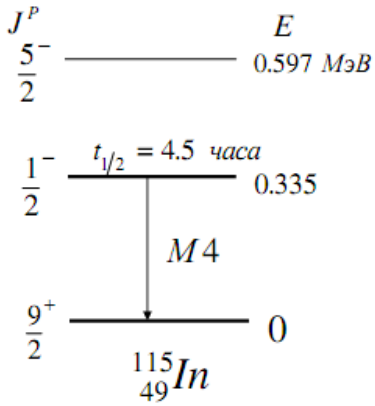


Рисунок 184. Изомерные состояния в ядрах.

$\frac{1}{2}^-$, $\frac{9}{2}^+$ - основное состояние. Если ядро свалилось сверху из состояния с энергией 0,335 МэВ. В основное состояние оно может перейти только одним способом – испустив M4 фотон. А M4 – фотон испустить сложно, поэтому ядро в этом состоянии живет 4,5 часа. Оно оказалось в возбужденном состоянии, чтобы перейти в основное, ему нужно унести большой момент количества движения и требуется на это 4,5 часа.

Внутренняя конверсия γ-квантов.

Имеется ядро в возбужденном состоянии, то есть у него есть запас энергии. Рядом электронная оболочка. У ядра есть 2 возможности: из возбужденного состояния перейти в основное состояние, испустив фотон. Но ядро взаимодействует с этой

электронной оболочкой, это электромагнитное взаимодействие, не слабое. Оно может передать энергию электрону и выбросить его из ядра. Это явления без образования фотона. Взаимодействие за счет виртуального фотона, это не то, что ядро родило фотон, а он выбил электрон. Это взаимодействие между возбужденным ядром и электроном через виртуальный фотон. Этот фотон выбивает электрон с этой электронной оболочки. Это явление называется внутренняя конверсия γ-квантов.

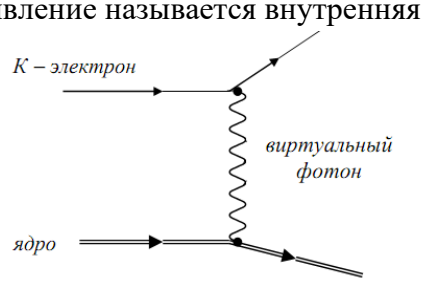


Рисунок 185. Внутренняя конверсия гамма-квантов

Есть ядро (Рисунок 185), есть К-электрон, он ближе находится, это виртуальный фотон, это ядро, которое перешло в основное состояние, сюда полетел электрон. При таком процессе электроны будут иметь строго монохроматическую энергию, потому что возбуждение ядра полностью передается электрону, и он полетел:

$$E_e = E - \varepsilon$$

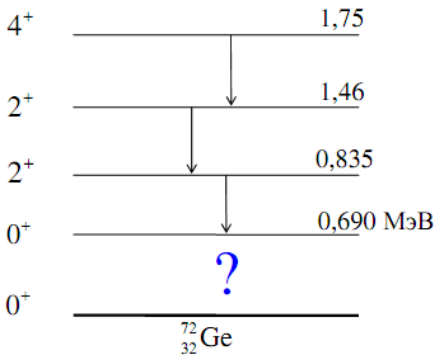


Рисунок 186. 0-0 переходы

Есть ядро германия. Есть основное состояние ядра, 0^+.Энергия 0,690 МэВ. Возбужденное состояние тоже 0^+. Как из 0^+ перейти в 0^+? Надо унести 0, а фотон имеет спин, равный 1. За счет реального фотона такой переход нельзя осуществить. Единственный выход – испустить электрон внутренней конверсии. Виртуальный E0-квант с нулевым моментом и положительной четностью может существовать. И этот квант обеспечивает снятие возбуждения ядра путем внутренней конверсии.

Резонансное поглощение γ-квантов

Ядро испускает гамма-квант. По всем законам физики ядро должно получит отдачу, ядро полетит в одну сторону, фотон в другую. Раз ядро полетело, оно забрало часть энергии. Можно ли сделать так, чтобы ядро эту энергию не забирало? Взять и

прибить ядро к чему-то тяжелому. Тогда не будет выскакивать ядро, всю отдачу будет принимать ядро и то, к чему ты его прибил. Прибить ядро нельзя, но если ядро будет в кристаллической решетке, то оно там сидит. Если оно испускает гамма-квант, то отдачу принимает не ядро, а вся кристаллическая решетка. Тогда отдача ядра будет маленькая, и всю энергию будет уносить фотон. Впервые это явление открыл Мессбауэр в 1958 году. Это называется явление ядерного резонанса, или эффект Мессбауэра. С помощью эффекта Мэссбауэра вы очень точно можете измерять энергию фотона, можете измерять очень тонкие эффекты: как меняется положение атомного ядра, когда оно находится внутри кристаллической структуры. Или имеется фотон с энергией 10 КэВ. Он поднялся со стола на потолок. Он теряет энергию, поднимается наверх. Энергия внизу не равна энергии наверху, различие в 16-17 знаке. Это было измерено с помощью эффекта Мэссбауэра и показано, что в гравитационном поле Земли энергия фотона меняется, потому что поле неоднородное.

Радиоактивное семейство 4n

Имеется ядро тория. Оно распадается с периодом полураспада 14 гигалет. И дает начало радиоактивному семейству. Если есть такое ядро, то вы будете иметь целую группу ядер, которые получаются в результате распада этого ядра. При β - распаде массовое число не меняется. Если имеется ядро, которое имеет массовое число A=4n, то в процессе будут получаться эти ядра (Рисунок 187).

Если ядро имеет (4n+1), то у вас будет получаться другое радиоактивное семейство. Если (4n+2), (4n+3), то тоже другие семейства. Существует 4 радиоактивных семейства, родоначальниками которых являются долгоживущие ядра, живущие дольше, чем период полураспада. Поэтому Беккерелю и удалось обнаружить явление радиоактивности.

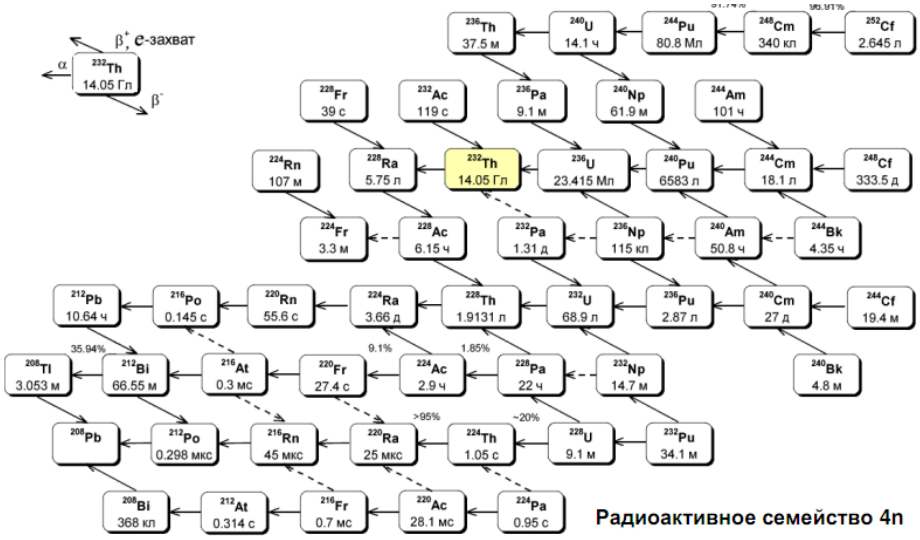


Рисунок 187. Радиоактивное семейство 4n

Запаздывающие протоны ^{21}Na

Есть ядро ^{21}Mg. Оно распалось в результате β^+- распада, распадается на (это основное состояние, первое возбужденное, второе, третье).

Рисунок 188. Запаздывающие протоны натрия 21

Если энергия связи протона, когда ядро находится в возбужденном состоянии больше, чем эта величина (следующее ядро на 1 протон меньше), то из этого возбужденного состояния могут распадаться протоны отсюда сюда. Это называются запаздывающие протоны, которые запускает ядро ^{21}Na. Запаздывающий потому, что протон из этих возбужденных состояний испускается мгновенно, но распад на эти возбужденные состояния происходит с периодом 0,1 с.

Распады ядер в области границы протонной стабильности

Имеется ядро $^{43}_{24}Cr$. Оно испускает β^+ распад на возбужденное состояние, далее идет распад с испусканием альфа-частицы, получается ядро скандия, отсюда испускается 2 протона, получается скандий-41, из этого состояния испускается кальций 38, альфа-частица плюс протон, титан плюс протон и так далее. Одно ядро в результате распада образует целое семейство ядер, в конечном состоянии изотопов кальция, скандия, титана, испускается альфа-частицы, протоны, два протона и т.д. Когда мы идем к границам протонной и нейтронной стабильности, там появляются новые типы радиоактивного распада.

Кластерная радиоактивность

Ядро может испустить альфа-частицу. А почему не может испустить ядро ^{12}C, серу 32? Так же будет: есть ядро, туда полетело ^{12}C, осталось ядро (А-12). Может быть такой распад? Да, потому что ^{12}C тоже связанная система, энергия позволяет, чтобы такой распад происходил. Но ядро ^{12}C должно преодолеть еще больший потенциальный барьер. В данном случае радий 223 испускает ядро-кластер ^{14}C, получается 208. Энергия 31,4 МэВ. Но вероятность распада на альфа-частицу по

сравнению с ^{14}C в 10 миллиардов раз больше (10^{10}). Такой распад есть, но его крайне трудно обнаружить (Рисунок 189).

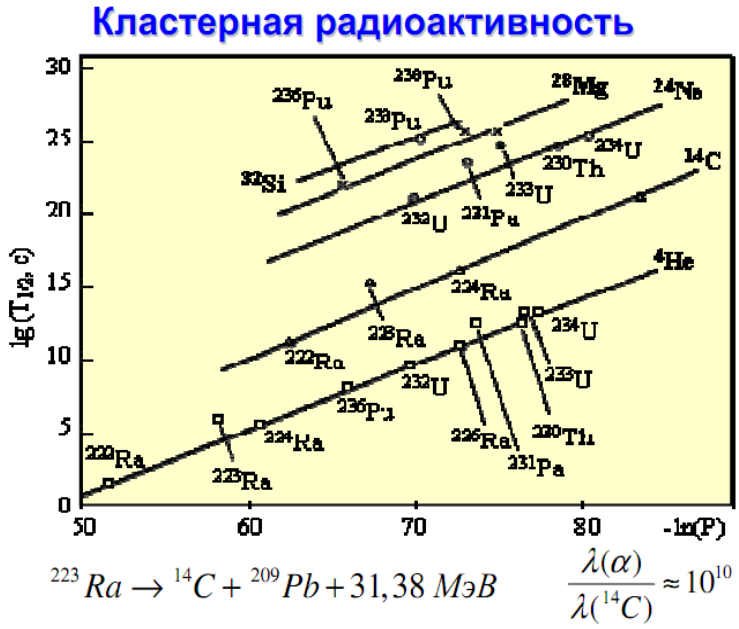


Рисунок 189.Кластерная радиоактивность

По оси у отложен $lgT_{\frac{1}{2}}$ для разных типов распада: испускание альфа-частиц из разных ядер, испускание углерода, испускание неона еще больше испускание магния еще больше, кремний еще больше период полураспада. Все эти явления были открыты с колоссальным трудом. Можем их прилично описать. Это явление называется кластерной радиоактивностью.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Лекция 11. Ядерные реакции

Рассмотрим несколько примеров ядерных реакций.

Резерфорд предложил своим сотрудникам взять источник α-частиц и облучать золотую фольгу.

$$\alpha + {}^{197}_{79}Au \to \alpha + {}^{197}_{79}Au$$

Это привело к тому, что α-частица рассеивалась на ядре золота 197, и Резерфорд, вопреки представлениям классической физики, сказал, что атом имеет сложную структуру: в центре атома находится массивное положительно заряженное ядро, которое окружено электронной оболочкой.

Что из себя представляет атомное ядро? Для этого Резерфорд взял α-частицы и начал бить не по тяжелому ядру, а по легкому ядру, чтобы кулоновское взаимодействие позволило ему как можно ближе подойти к ядру. Потому что между налетающей частицей и мишенью, на которую частица налетает, существует кулоновское отталкивание.

$$\alpha + {}^{14}_{7}N \to {}^{17}_{8}O + p$$

Он взял легкое ядро, облучал его α-частицами, из него вылетали положительно заряженные частицы, протоны. Они имеют массу, как масса атома водорода (примерно). Было сделано утверждение, что внутри атомного ядра находятся протоны. В результате ядерной реакции можем одно ядро превратить в другое.

Возникла новая модель атомного ядра. Имеется ядро, в котором находятся протоны. Надо было сделать правильную массу атомного ядра. Поэтому говорим, что число протонов в атомном ядре 14, а для того, чтобы получить заряд ядра 7, нужно добавить туда, в ядро, электроны. Вовремя β-распада мы видим, что из ядра вылетают электроны. Поэтому казалось все логично. Но почему электроны сидят внутри атомного ядра? Если они ограничены в очень маленьком объеме, то они должны иметь очень большую энергию и вылетать из ядра, ядро не может их удержать. Резерфорд тогда сказал, что электроны, которые окружают атомное ядро, — это одни электроны, электроны, которые связаны с протонами в ядре, — это другие электроны. Там получается нейтральное связанное состояние. Это позволило Чедвику, когда он обстреливал α-частицами ядра бериллия, обнаружить нейтрон. Это самое якобы связанное состояние протона и электрона.

$$\alpha + {}^{9}_{4}Be \to {}^{12}_{6}C + n$$

Но сегодня мы знаем, что нейтрон – это самостоятельная частица. Как только это было получено, возникла модель атомного ядра, которая существует на сегодняшний день: атомное ядро состоит из протонов и нейтронов. Под действием α-частиц мы поняли, как устроено атомное ядро.

Берем α-частицы, и обстреливаем ядро ${}^{27}_{13}Al$. Оказывается, появилось ядро фосфора и нейтрон.

$$\alpha + {}^{27}_{13}Al \to {}^{30}_{15}P + n$$

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Но мы выключаем источник облучения (ставим фольгу), а из ядра фосфора продолжают вылетать какие-то положительно заряженные частицы. Потому что впервые в результате этой реакции образовалось радиоактивное ядро (β^+ – радиоактивное ядро), оно распадается с периодом полураспада 2,5 мин, превращаясь в ядро кремния:

$$^{30}_{15}P \xrightarrow{\beta^+\nu_e} {}^{30}_{14}Si$$

С помощью α-источника было сделано много выдающихся открытий: открыто ядро, получен состав атомного ядра, впервые открыто явление радиоактивности. Мы поняли, что можем из одни х элементов получать другие. Потому что стабильный элемент фосфора – это фосфор 29. Все это происходит в результате ядерной реакции.

Ядерная реакция – это процесс, который происходит, когда вы берете ядро-мишень и ударяете по нему другой частицей. Это может быть протон, π-мезон, нейтрон или другая ускоренная частица. Налетающая частица называется снарядом. Ядерная реакция – это процесс взаимодействия между мишенью и снарядом.

Есть падающая частица, есть ядро – область взаимодействия. Падающая частица попадает в область взаимодействия, дальше из области взаимодействия вылетают продукты реакции.

Что происходит в ядре? В опыте Резерфорда налетающая частица, даже не подойдя к ядру, отклоняется кулоновским полем. Этот процесс называется упругое потенциальное рассеяние. Упругое рассеяние – это процесс, в котором внутренние характеристики налетающей частицы и ядра не изменяются. Изменяются энергия и импульс налетающей частицы. Часть энергии она отдала ядру.

Частица вошла в ядро. Могут быть 2 типа крайних процессов. Прямой процесс: есть ядро, в нем есть нуклон, налетающая частица бьет по нуклону и выбивает нуклон, а все остальные нуклоны этого не почувствовали. Ядро сильно не возбудилось, а в результате того, что налетела частица, она выбила нуклон, фрагмент.

Есть ядро, налетела частица и застряла в ядре, потеряла свою энергию. Ядро забыло, как оно получило эту энергию. Например, ^{28}Si, в него влетел нейтрон, получилось ядро ^{29}Si. Оно не помнит, это есть самостоятельное ядро. Оно кипит, между нуклонами происходит перераспределение энергии, наконец, эта энергия скапливается на каком-то фрагменте, нуклоне, и эта частица из ядра вылетает. То есть ядро забывает, как оно образовалось. Получилась составная система. И из этой системы вылетает какой-то фрагмент. Это продукты реакции. Между двумя крайними случаями будет предравновесный процесс, когда и то играет роль, и то играет роль. Прямые процессы – характерное время такое, чтобы ядро не возбудить, — это время пролета налетающей частицы через ядро со скоростью света ($10^{-24} - 10^{-25}$с). Это время прямых процессов. Составное ядро живет гораздо дольше. Есть входной канал реакции и выходной канал.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Сечение реакции σ и число событий N

Имеем ускоритель, который дает какое-то число частиц J – это поток частиц через $см^2$ поверхности мишени. Есть мишень, ускоритель, этот ускоритель дает поток частиц. В зависимости от того, какое число частиц в кубическом см N: число вылетающих частиц будет тем больше, чем больше N. Одно дело, когда у вас газовая мишень, там мало частиц, другое дело, когда твердая. L – толщина мишени (чем толще мишень, тем больше частиц вылетает), площадь облучаемой мишени – потому что стоит j, поток через $см^2$ мишени. Если облучаю 1 $см^2$ мишени, то число частиц будет одно, если 2 $см^2$, то число частиц будет в 2 раза больше. Основная величина, которая характеризует, что происходит в ядре, это сечение реакции. Это вероятность процесса.

$$N = j \cdot n \cdot l \cdot s \cdot \sigma$$

Обычно эксперимент делаем таким образом: имеется мишень, на нее налетает поток частиц, под каким-то углом устанавливаю детектор. Он перекрывает какой-то телесный угол, и частицы вылетают под этим телесным углом. Наряду с полным числом частиц, которое вылетает в результате ядерной реакции, мы видим дифференциальное сечение: частицы, которые вылетают внутри телесного угла $d\Omega$ под углом (θ, φ), и их видит детектор:

$$\frac{dN(\theta,\varphi)}{d\Omega} = j \cdot n \cdot l \cdot s \cdot \frac{d\sigma(\theta,\varphi)}{d\Omega}$$

В зависимости от того, что мы видим, мы создаем какие-то модели реакция и пытаемся понять, что там происходит.

Законы сохранения в ядерных реакциях

Когда происходят какие-то процессы, то всегда выполняются законы сохранения.

1. Закон сохранения числа нуклонов. Закон сохранения числа барионов. Нуклоны (протоны, нейтроны) являются барионами, поэтому закон сохранения числа нуклонов превращается в закон сохранения числа барионов. Но до момента, пока не начинается рождение античастиц. Тогда нужно брать суммарное число частиц и античастиц.
2. Закон сохранения электрического заряда.
3. Закон сохранения энергии.
4. Закон сохранения импульса.

Это законы сохранения классической физики. Они в данном случае работают.
Если имеем реакцию: маленькая частица налетает на массивное ядро A, в результате вылетает частица b и остается ядро B (Рисунок 190): $a + A \rightarrow b + B$

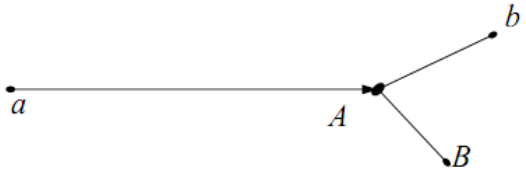


Рисунок 190. Реакция

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Можем ввести понятие энергии реакции. Это энергия покоя начальная частиц и энергия частиц в конечном состоянии.

$$Q = (m_a + m_A - m_b - m_B)c^2$$

Если эта величина больше 0, то реакция будет проходить при любой энергии, потому что образую систему, которая имеет большую энергию, чем частица, которая получается в конечном состоянии, их энергия покоя. Если Q< 0, то чтобы данная реакция пошла, нужно в систему внести энергию. Это можно сделать только одним способом: ускорит частицу a, дать ей дополнительную энергию, она внесет эту энергию в ядро, и оно сможет развалиться, если достаточная энергия. Поэтому есть порог реакции:

$$E_{\text{порог}} = \frac{(m_a + m_A - m_b - m_B)(m_a + m_A + m_b + m_B)c^2}{2m_A}$$

Это минимальная кинетическая энергия налетающей частицы, при которой может происхожить данная реакция. Посмотрим на массы: a- маленькая частица, у нее 5-15 МэВ по сравнению с A – ядро. Самое легкое ядро – это протон, 940 МэВ. Поэтому величиной можем пренебречьь и получается простая формула: $E_{\text{порог}} = |Q|\left(1 + \frac{m_a}{m_A} + \frac{Q}{2m_A}\right) \approx |Q|\left(1 + \frac{m_a}{m_A}\right)$

Имеется ядро, налетает частица, которая обладает энергией. Она движется с какой-то скоростью, значит, имеет какой-то импульс. Она в систему вносит этот импульс, и продукты реакции должны с этим импульсом вылететь. Закон сохранения импульса приводит к этому соотношению.Чем меньше это соотношение, тем ближе порог реакции к энергии реакции.

Возьмем α-частицу, она налетает на ядро свинца. Теперь повернем реакцию. Есть α-частица, ядро гелия, налетает на нее свинец. Пороги реакции будут кардинально отличаться. Внимание на член $\frac{m_a}{m_A}$, вверху масса налетающей частицы, внизу – мишень. Если это свинец, то будет 208/4, а когда налетает α-частица, то будет 4/208.

Ускоряем частицу, мучаемся, чтобы получить новые реакции, а все уходит бесполезно в ускорение центра масс. Выход в том, чтобы сделать так, чтобы эта энергия не тратилась. Возьмем, например, два протона, два ядра свинца 209. Ускорим их до одинаковых энергий, столкнем, импульс 0. В пустоту ничего не уходит, все уходит в продукты реакции. Отсюда идея – организовывать встречные пучки. Но, как всегда, природа дает подарок, но одновременно ограничивает. Когда берете твердую мишень и бьете по ней частицами, у вас число частиц мишени большое. А когда берете 2 пучка и сталкиваете, то плотности частиц оказываются очень маленькими. Столкнуть пучки так, чтобы они в точнее соприкосновения имели максимальную плотность, были максимально сжаты, это основная проблема ускорителей на встречных пучках.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Закон сохранения момента количества движения J и четности P

Частица A налетает, она имеет какой-то момент количества движения $\overline{J_a}$, спин. Мишень тоже имеет спин J_A, орбитальный момент налетающей частицы относительно ядра A $\overline{l_{aA}}$. То же самое стоит справа.

$$\overline{J_a} + \overline{J_A} + \overline{l_{aA}} = \overline{J_b} + \overline{J_B} + \overline{l_{bB}}$$

Эта векторная величина должна сохраняться.

Четность частицы a, четность частицы A и четность для частиц в конечном состоянии связаны:

$$P_a P_A (-1)^{l_{aA}} = P_b P_B (-1)^{l_{bB}}$$

В ядерных реакциях, происходящих за счет слабого взаимодействия, четность не сохраняется.

Пример. Имеется ядро ^{19}F, на него налетает протон, получается ядро ^{20}Ne. Спин протона равен половинке, спин ядра фтор 19 - $^{1}/_{2}^{-}$. В результате получается состояние с моментом 1^+. С испусканием α-частицы оно распадается на основное или возбужденное состояние. α-распад должен происходить так, что α-частица уносила максимальную энергию., тогда ей легче проходить через потенциальный барьер. Казалось бы, распад должен происходить в состояние 0^+, но туда он происходить не может. Распад идет на возбужденное состояние с энергией больше 6 МэВ - 3^-. Это видно отсюда:

$\overrightarrow{J_{Ne}} = \overrightarrow{J_{^{16}O}} + \overrightarrow{J_\alpha} + \vec{l}$, где $\overrightarrow{J_\alpha} = \vec{0}, \overrightarrow{J_{^{16}O}} = \vec{3}, \overrightarrow{J_{Ne}} = \vec{1}$

$P_{Ne} = P_\alpha P_{^{16}O}(-1)^l$ *или* $+1=(+1)(-1)(-1)^l, l = 3$

Поэтому возможен распад на это состояние отрицательной четности.

Если распадается на ноль (основное и первое возбужденное состояния 0^+), то такой распад запрещен, так как: $\vec{l}=\vec{0}+\vec{0}+\vec{l}$ (l=1). В этом случае не выполняется закон сохранения четности: $+1 \neq (+1)(+1)(-1)^{l=1} = -1$

Закон сохрнения изоспина.

Изоспин налетающей частица, ядра-мишени, изоспин частицы, которая вылетает, изоспин ядра, которое остается, связаны:

$$\overrightarrow{I_a} + \overrightarrow{I_A} = \overrightarrow{I_b} + \overrightarrow{I_B}$$

Изоспин сохраняется в сильных взаимодействиях.

$$(I_3)_a + (I_3)_A = (I_3)_b + (I_3)_B$$

Проекция изоспина I_3 сохраняется в сильном и электромагнитном взаимодействиях.

Пример. Показать, чо в реакции неупругого рассеяния дейтронов на ядре $^{10}_5B$, идущей за счет сильного взаимодействия, невозможно возбуждение уровней этого ядра с изоспином I=1.

$$d + {}^{10}_5B \rightarrow d + {}^{10}_5B^*$$

Дейтрон и $^{10}_{5}B$ имеют изоспин 0 (Z=N), $I_3 = \frac{(Z-N)}{2} = 0$. Справа тоже изоспин дейтрона 0. Сохранение изоспина возможно, если изоспин конечного ядра $^{10}_{5}B^*$ так же равен 0.

Модели ядерных реакций

Имеются модели ядерных реакций, точно описать ядерные реакции трудно. Поэтому берем предположения, в рамках которых пытаемся реакцию описать.

Составное ядро

Имеется ядро, налетает частица, она входит в состав ядра, застревает там, ядро кипит и из него что-то вылетает. Сечение реакции, если налетает частица a и вылетает частицы b, можем записать:

$$\sigma_{ab} = \sigma_{aC} W_b$$

где σ_{aC} - сечение образования составного ядра,

W_b- вероятность распада составного ядра с испусканием частицы b.

Образовалась какая-то система, в ней возможны различные каналы распада: распад с испусканием частицы a, распад и испусканием частицы b и так далее. Вероятность распада считаем через ширину распада Г, здесь все каналы с испусканием частиц:

$$\Gamma = \Gamma_a + \Gamma_{b'} + \Gamma_{b''} + \cdots = \Gamma_a + \sum_b \Gamma_b = \sum_i^{\text{все}} \Gamma_i$$

Испускание частицы b- это нужно взять частный канал, разделить на полную ширину канала:

$$W_b = \Gamma_b / \Gamma$$

$$\sigma_{ab} = \sigma_{aC} \frac{\Gamma_b}{\Gamma}$$

Тогда будем иметь частица a – протон, налетает на ядро, образует составное ядро с массовым числом на 1 больше, с зарядом на 1 больше. Из него вылетает альфа-частицы, протон, нейтрон, электрон, дейтрон, 2 нейтрона. Это и есть вероятности того, что вылетает назад. Величина Г будет характеризовать ядро, которое образовалось, в возбужденном состоянии и с какой вероятностью оно будет по различным каналам распадаться.

Посмотрим, насколько эта модель хорошая.

Беру две разные налетающие частицы, берем 2 разных ядра (Рисунок 249).

α-частица налетает на ядро никель 60. α-частица налетает на ядро ^{63}Cu.Общее в этих реакциях то, что составное ядро одинаковое - ^{64}Zn. Если то, что я сказал, правильно, то это ядро забудет, как оно образовалось, и оно будет распадаться одинаково по различным каналам.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

α-частица налетает на ядро никель 60, образовался ^{64}Zn, который распался на ^{63}Zn и нейтрон. Во втором взаимодействии тот же цинк распадается по тому же каналу. Сечения должны быть одинаковые, независимо от того, как они образовались.

Чтобы расписать реакцию, когда она происходит под действием нейтронов, она будет состоять из трех частей. Сечение, вероятность образования составного ядра нейроном n будет определяться тремя множителями:

1. Нейтрон попадает в ядро, нейтрон должен попасть в область действия ядерных сил, чтобы провзаимодействовать с ядром (σ_0).
2. Нейтрон должен проникнуть через потенциальный барьер, войти в состав ядра, чтобы образовать составную систему (вероятность P).
3. Нейтрон должен застрять в ядре, если он не застрянет, а сразу вылетит, то это будет прямой процесс (вероятность ξ).

Таким образом,

$$\sigma_{nc} = \sigma_0 \cdot P \cdot \xi$$

Положим $\xi = 1$, получим 2 сомножителя.

Имеется ядро какого-то радиуса. Ядро взаимодействует с нейтроном. Классическая физика говорит, что ядро имеет площадь πR^2. Если нейтрон попадает в эту площадь, то сечение взаимодействия будет $\sigma = \pi R^2$. В квантовой физике нейтрон обладает волновыми свойствами, это не точка, он обладает корпускулярно-волновыми свойствами. Нейтрон имеет определенную длину волны. Поэму вместо πR^2подставляем $(R + \lambda\!\!\!^{-}_n)$:

$$\sigma_0 = \pi(R + \lambda\!\!\!^{-})^2$$

Длина волны нейтрона легко считается.

$$\lambda\!\!\!^{-}_n(\text{Фм}) = \frac{4{,}5}{\sqrt{E(\text{МэВ})}}$$

С первым множителем разобрались.

Второй множитель – нейтрон должен проникнуть внутрь ядра. Нейтрон видит перед собой потенциальную яму, он должен в нее проникнуть (Рисунок 191).

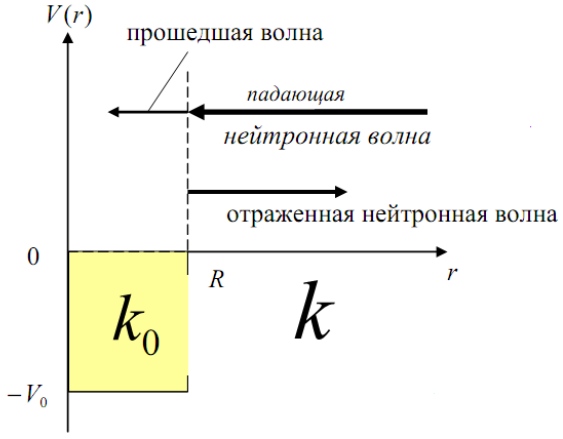


Рисунок 191. Прохождение потенциального барьера нейтроном.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Квантовая теория говорит следующее: есть падающая нейтронная волна, яма характеризуется волновым числом k_0, падающая волна характеризуется волновым числом k. На границе произойдет отражение нейтронной волны. Надо понять, сколько пройдет в потенциальную яму. Квантовая теория дает простое соотношение: проницаемость потенциального барьера P для частицы массы m с кинетической энергией E и орбитальным моментом l=0:

$$P = \frac{4kk_0}{(k+k_0)^2}$$

где $k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$ $\qquad$ $k_0 = \frac{\sqrt{2m(E+V_0)}}{\hbar}$

V_0 - потенциальная яма.

Вероятность прохождения через барьер, если энергия нейтрона меньше V_0, в классическом случае равна нулю, а в квантовом – такая вероятность есть. Вероятность образования составного ядра будет определяться вероятностью прохождения через потенциальный барьер.

Положим ξ=1.

$$\sigma_{nC} = \sigma_0 P\xi \approx \pi(R+\lambda\!\!\!^{-}_n)^2 \frac{4kk_0}{(k+k_0)^2}\xi$$

Тепловые нейтроны ($E \leq 10$ эВ)

Это нейтроны с энергией меньше 10 эВ (Рисунок 192). У них очень большая длина волны. То есть имеется маленькое ядро, а нейтрон имеет большую длину волны, поэтому нейтрон на больших расстояниях, которые характеризуются этой длиной волны, будет это ядро чувствовать. Поэтому сечение будет $\pi(R+\lambda\!\!\!^{-})^2$. $\lambda\!\!\!^{-}$, длина волны, будет здесь работать, когда энергия нейтронов маленькая.

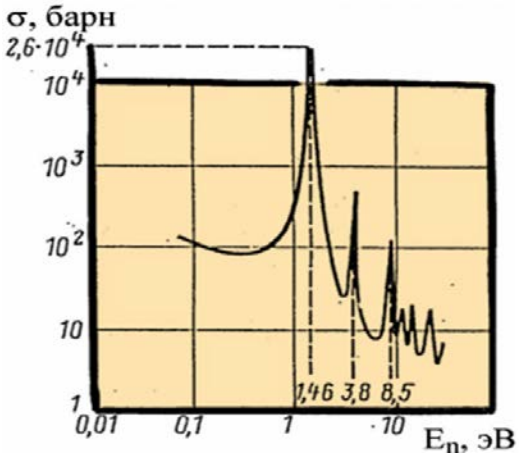


Рисунок 192. Тепловые нейтроны

Сечение будет пропорционально:

$$\sigma \sim \frac{1}{\sqrt{E}} \sim \frac{1}{v_н}$$

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

E=mv^2- для частиц , которые имеют маленькую кинетическую энергию, $v_н$ - скорость нейтрона.

Имеется нейтрон. Одно дело, когда он быстро пролетает над ядром, имеет большую энергию, а другое – когда он медленно летит мимо ядра, чувствует это ядро и взаимодействует с ним. Сечение взаимодействие тепловых нейтронов с кадмием – 2,6 10^4 барн. Барн – это 10^{-24}см. в 10 тыс раз больше, чем размер ядра. Мы можем это использовать, если хотим поглотить нейтроны, опускаем туда кадмиевый стержень. И кадмиевый стержень будет эффективно поглощать нейтроны, а вы управляете реактором.

Другой процесс – ксенон. Тут сечение 3,5· 10^6барн. Это уже у миллион раз больше размеров ядра. На следующей лекции расскажу. Это очень нехорошее ядро для работы ядерных реакторов.

Откуда берутся максимумы? Представим себе ядро как шарик (капельная модель ядра), в котором могут быть разные возбужденные состояния. Когда энергия налетающей частицы (hω), совпадает с резонансной энергией ядра, то у вас наиболее сильно происходит возбуждение ядра. Представит себе это можно так: имеется шарик, на котором налеплены разные резонаторы. Мы начинаем облучать переменной длиной волны. Как только длина волны совпадает с частотой резонатора, происходит наиболее сильное возбуждение данного резонатора.Увеличиваем частоту, ушел от этого резонатора. Возбуждается следующий. Таким образом, в ядре имеются возбужденные состояния. Энергия налетающей частицы, которую она внесла в ядро, совпадает с энергией резонанса, у вас будет максимум. Это как в механике, радиотехнике. Как только частоты совпадают, возникает резонанс. Описывается формулой Брейта-Вигнера:

$$\sigma_{nn} = \pi\lambda\!\!\!^{-2}_n \frac{\Gamma_n^2}{(E - E_r)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}$$

E - энергия налетающей частицы,

E_r - энергия резонанса.

Как только энергия налетающей частицы совпадает с энергией резонанса, отношение становится максимальным, и все будет определяться ширинами резонанса. То есть имеется ядро, которое имеет возбужденное состояние. Подходим к возбужденному состоянию, на подходе сечение увеличивается, достигает максимума, когда энергия совпадают с энергией резонанса, когда мы уходим от него - сечение падает.

Что такое низкие энергии? Нейтрон с энергией 0 МэВ захватывается ядром А, получается ядро (А+1). Чему равна энергия возбуждения ядра (А+1)? Она будет равна энергии связи нейтрона в ядре (А+1), потому что, чтобы вытащить из ядра (А+1) нейтрон, нужно затратить энергию отделения нейтрона. Тогда остается ядро А с нулевой энергией. У меня есть ядро А, оно захватывает нейтрон и сразу оказывается в

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

области энергии возбуждения 8 МэВ, а уровней там много. Поэтому там идут резонансные ядерные реакции, идущие по формуле Брейта-Вигнера.

По мере того, как увеличиваю энергию нейтрона, ширины уровней будут увеличиваться, плотность уровней будет увеличиваться (потому что это число возможных распадов увеличивается) и резонансы начнут перекрываться по мере того, как уходим к более высоким энергиям, никаких резонансов нет, все они перекрылись и получается плоское сечение.

Нейтроны малых энергий проявляются в виде резонансов, они приводят к тому, что сечения большие. Если будем иметь нейтроны высоких энергий $\frac{1}{\sqrt{E}}$. Длина волны никакой роли не играет, сечение будет πR^2.

Потрясающий способ: берем быстрые нейтроны большой энергии, 100 МэВ, бросаю на ядро, смотрю, сколько нейтронов провзаимодействует с ядром, и я определяю размер ядра, πR^2 – размер ядра. Получаю разные методы определения размеров ядра: рассеиваем частицы, электроны, из альфа-распада знаем размер ядра, из опытов по рассеянию нейтронов. Все должно сойтись.

Посмотрим, как ведет себя сечение взаимодейсвия быстрых нейтронов с энергией больше 1 МэВ.

На больших энергиях $\lambda\!\!\!^{-}$ исчезает, получается πR^2. $R = 1{,}2A^{1/3}$Фм.

Откуда берутся волны, а не монотонно спадают? Есть волна падающая, есть рассеянная. Между ними существует интерференция. Вот ее мы и видим.

Это сечение на свинце, у свинца радиус больше, это – на кадмии, это – на меди. Получаем еще один метод определения размеров ядра с помощью рассеяния быстрых нейтронов.

Составное ядро

Мы видим, что есть реакции, которые идут в результате быстрых процессов, есть реакции, которые идут через составное ядро. Какие причины делают составное ядро долгоживущим?

1. Когда ядерная частица попадает в ядро, между ними происходит ядерное взаимодействие. Это значит, что она быстро теряет свою энергию и запутывается там. Передает всю свою энергию другим частицам и ждем, когда все это на какой-то частице сконцентрируется, чтобы она могла из ядра вылететь.
2. Малая проницаемость потенциального барьера. Одно дело, если на ядро налетает нейтрон и вылетает нейтрон, а другое дело, когда падает нейтрон, вылетает протон или альфа-частица. Протон и альфа-частице надо пройти через потенциальный барьер, у нейтрона потенциальный барьер связан только с орбитальным моментом.
3. Вылет частиц затруднен из-за выполнения разных законов сохранения и правил отбора. Частица, которая должна уносить большой орбитальный

момент, значит, этот распад будет подавлен по сравнению с распадом, когда орбитальный момент равен нулю.

4. Гамма-кванты сильно перестраивают ядро. Поэтому эти процессы происходят за счет электромагнитного взаимодействия, а константа электромагнитного взаимодействия 1/137, а константа сильного взаимодействия – 1. Поэтому эти процессы будут происходить сильно подавленно по сравнению с характерным ядерным временем $10^{-22} - 10^{-23}$с.

По этим причинам составное ядро живет долго.

Прямые ядерные процессы срыва и подхвата

Прямые процессы можно назвать срывом и захватом.

Имеем дейтрон (протон и нейтрон) и ядро А (Рисунок 193).

Рисунок 193. Реакция срыва

Дейтрон подлетает к протону, в результате ядро А захватило нейтрон, образовалось составное ядро А и нейтрон, а протон полетел. Это называется реакция срыва. С дейтрона сорвали нейтрон и поместили сюда.

Одновременно может быть такой процесс.

Рисунок 62. Реакция подхвата

Летит протон, есть ядро (А+1) (Рисунок 194). Оно из этого ядра подхватило нейтрон, образовалась дырка, получилось ядро А, а нейтрон прицепился к протону, и полетел дейтрон. Это называется реакция однонуклонной передачи.

В одном случае дейтрон передает нейтрон сюда. В другом случае протон подхватывает нейтрон из ядра и летит в виде дейтрона. Изучая эти реакции, можно понять, куда садится нейтрон в ядре, откуда вырывается нейтрон из ядра. Это дает мне информацию о том, на каких оболочках находятся протон и нейтрон в ядре. Я знаю, откуда вырвал, знаю энергию частиц, могу подтвердить оболочечную модель ядра.

Рассмотрим реакцию (Рисунок 195).

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

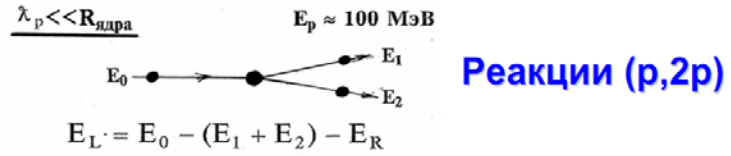


Рисунок 63. Реакция (p, 2p)

Ядро А, на него налетает протон с энергией 100 МэВ. Это значит, что длина волны гораздо меньше размеров ядра. Энергия протона E_0 будет расходоваться на то, чтобы из ядра выбить один протон и второй протон, который вылетает (E_1, E_2 энергия вылетающих протонов). При этом ядро будет иметь энергию отдачи, а избыток энергии между тем, что налетело и тем, что осталось в конце возбужденных состояний, дает энергию связи нуклона на оболочке.

Возьмем ядро ^{40}Ca (Рисунок 196). Оно имеет полностью заполненные оболочки 1s, 1p, 1d-2s. Если вырывается нуклон из оболочки 1d-3/2 (d оболочка - верхняя оболочка), следующая оболочка 1d-5/2 (спин-орбитальное расщепление), то вероятность выбивания протона из оболочки 1d-3/2 будет даваться функцией, выбивание протона с 1d-5/2 – более глубокой функцией, она более глубоко расположена, при большей энергии. Это информация о том, как расположены протонные уровни в ядре кальция.

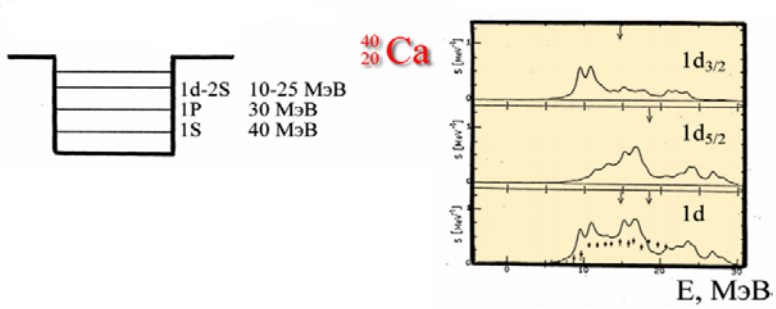


Рисунок 64. Выбивание протона из ядра кальция

Вы берете разные ядра, облучаете протонами, электронами, смотрите, что вылетает, определяете энергии, отсюда сразу можно сказать, что из себя представляет оболочечная модель ядра. Прямые ядерные реакции дают информацию о том, как расположены нуклонные состояния в ядре.

Что дает реакция, когда сел нейтрон? Нейтрон может сеть только на свободную оболочку. Поэтому он садится на них, смотрим, сколько нейтронов может сесть на разные оболочки. Отсюда определяем J, потому что число нейтронов, которое может сесть на данную оболочку – (2J+1). Если J=3/2, то на данную оболочку может сесть 4 частицы со спинами 3/2, ½, -3/2,-1/2. Мы знаем положение этой оболочки и знаю, сколько туда может сесть нейтронов. Чем больше свободного места, тем больше вероятность того, что нейтрон сядет на эту оболочку. Изучая эти вещи, получаем представления о свойствах, о структуре атомных ядер.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Взаимодействие γ-квантов с атомными ядрами

Ситуация исключительно красивая. Берем фотоны маленьких энергий. Это энергии меньше энергии отделения нуклона. Фотон возбуждает какое-то состояние в ядре – возбужденное состояние. Это коллективное состояние, колебательное состояние, вращательное (Рисунок 197).

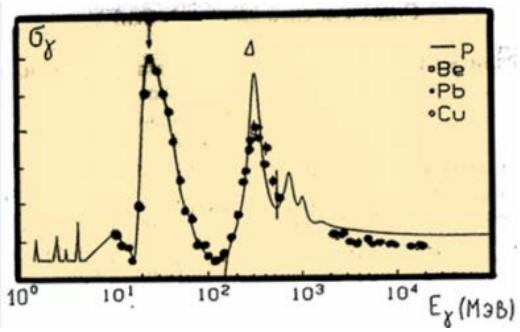


Рисунок 65. Взаимодействие гамма-квантов с атомными ядрами

Ядро поколебалось в этом состоянии, перешло на более низкое состояние, 6^+, 4^+, 3^+, 2^+. И в результате вижу пики, которые имеют какие-то энергии, которые характеризуют энергии возбужденных состояний ядра. Дальше увеличиваем энергию фотона. Фотон видит ядро, видит, что ядро состоит из протонов, видит, что их сколько-то и как-то они расположены. Тонкостей не видит, потому что длина волны пока большая. Электромагнитная волна начинает колебать протоны относительно нейтронов. Появляется гигантский дипольный резонанс. Под действием падающей электромагнитной волны протоны колеблются относительно нейтронов. Еще уменьшаем длину волны. Теперь фотон уже не видит ядра. Фотон возбуждает нуклоны. Это возбужденное состояние нуклона в ядре. Таким образом, большая длина волны – резонансы Брейта-Вигнера, уменьшаю длину волны – колебания всего ядра, еще уменьшаю – вижу отдельные нуклоны, могу возбудить отдельные состояния в нуклоне. Если взять сечение и отнести к числу нуклонов в ядре, то увидите, что картинки абсолютно одинаковые. γ-квант видит протон внутри ядра, и ему все равно, в каком ядре, потому что он видит конкретно протон, а какие соседи, он не видит. Взаимодействует с конкретным протоном внутри ядра.

Мы говорим, что фотон падает на ядро, и там возбуждаются колебания. Если ядро сферическое, то будет одна гармоника, потому что колебания вдоль осей будут одинаковые. Если ядро эллипсоид, то колебания вдоль одной оси – одна величина, вдоль другой – другая величина. Поэтому изучая сечение взаимодействия фотонов с ядром, получаем, что если ядро сферическое, то будет один максимум. А если ядро деформировано, то максимум расщепляется на 2 компоненты. Это дает информацию о тот, какая форма атомного ядра, какие там возникают колебания и т.д. Это взаимодействие фотонов с атомными ядрами дает информацию о свойствах атомных ядер.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Реакции (γ, p), (γ, n) на ядре $^{90}_{40}Zn$

Имеется ядро цирконий 90, — это ядро, которое имеет 40 протонов и 50 нейтронов, массовое число 90. Поэтому изоспин ядра в основном состоянии будет равен $I(^{90}_{40}Zn) = \frac{N-Z}{2} = 5$.

Под действием фотонов может возбуждаться 2 ветви гигантского резонанса: одна с изоспином основного состояния, вторая – со изоспином на 1 больше. Состояние с изоспином, равным 5, располагается на энергии 15 МэВ, а состояние с изоспином 6 располагается на энергии 25 МэВ. Посмотрим, как эти состояния могут распадаться (Рисунок 1+8).

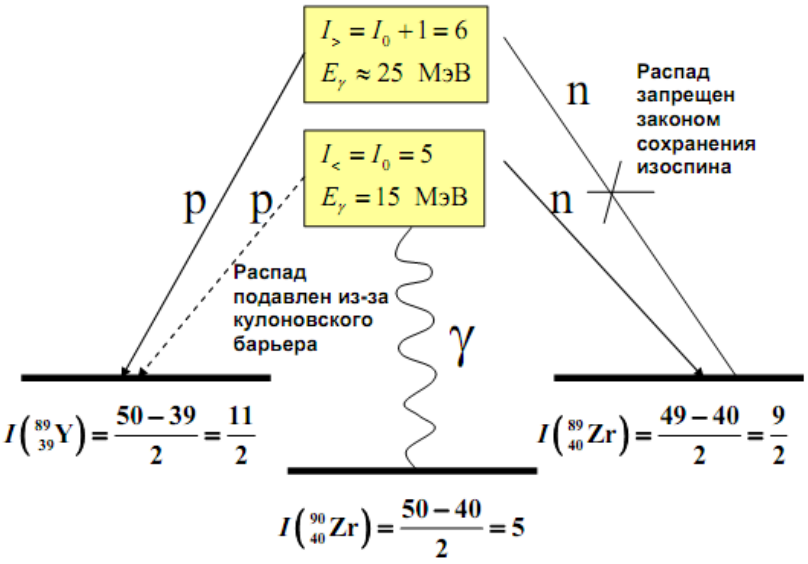


Рисунок 66. Реакции на ядре Zr.

Правое состояние распадается с испусканием нейтронов, получается ядро циркония 89. У него Z=40, а число нейтронов на единицу меньше, поэтому изоспин будет 9/2. Слева реакция с испусканием протонов. Когда испускается протон, получается ядро иттрия 89, изоспин 11/2. Если изоспин 11/2, изоспин у циркония 5, у протона изоспин ½. 5+1/2=11/2. Все правильно. 6+1/2=11/2. То есть протоны могут распадаться из обоих состояний.

Посмотрим на нейтроны. Изоспин 9/2. 9/2+1/2=5, получается. 9/2+1/2 – 6 не получается. Имеем ситуацию, когда нейтроны могут распадаться с состояния с изоспином 5, а из состояния с изоспином 6 распадаться не могут. Протоны могут распадаться и из состояния 5, и из состояния 6. Но, если энергия возбуждения будет больше энергии протонов, поэтому протоны распадаются из обоих состояний, а нейтроны только из одного (15 МэВ). Протоны распадаются преимущественно из состояния 25 МэВ, потому что у них энергия большая. Если мы будем измерять сечение реакции с вылетом протонов и с вылетом нейтронов, то мы обнаружим, что гигантский резонанс находится в разных местах (Рисунок 199):

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

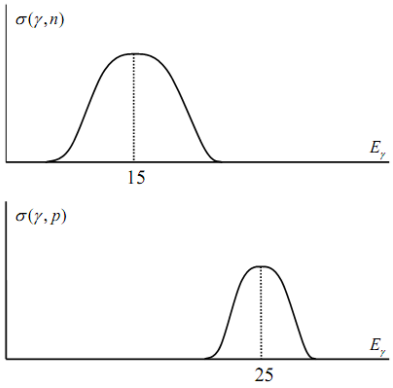


Рисунок 67. Гигантский резонанс протонов и нейтронов

Свойства атомных ядер отражаются на том, как происходят распады этих состояний.

Взаимодействие γ-квантов с ядрами. Высокие энергии

Очень интересное свойство фотонов. Фотон имеет спин, равный 1, поэтому, когда он движется в пространстве, за счет того, что существуют квантовые флюктуации, он может превращаться в частицы со спином 1. Он может превратиться в ρ-мезон, ω-мезон, φ-мезон (Рисунок 200).

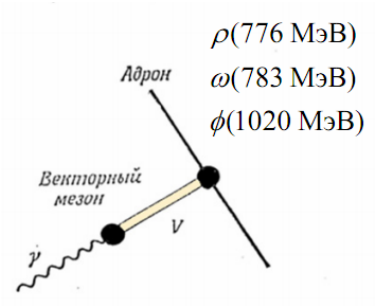


Рисунок 68. Рождение векторного мезона

Летит фотон, он превратился в виртуальный векторный мезон и может провзаимодействовать с нуклоном. Весь вопрос в том, с какой вероятностью он превращается в векторный мезон, и что происходит (Рисунок 201)?

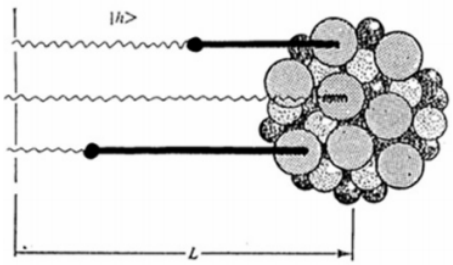


Рисунок 69. Взаимодействие гамма-кванта с нуклоном

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Нижний фотон ни во что не превратился, он чувствует весь объем ядра. Второй фотон превратился в векторный мезон и взаимодействует с нуклонами, которые находятся на поверхности. Сечение взаимодействия фотонов будет пропорционально полному числу A нуклонов в ядре и числу нуклонов, которые находятся на поверхности, а число нуклонов на поверхности равно $R^2 = A^{2/3}$. Когда изменяем сечение, то видим, что оно хорошо аппроксимируется формулой:

$$\sigma(\gamma, A) = aA + bA^{2/3}$$

При взаимодействии гамма-квантов с ядрами энергии высокие.

Формула Резерфорда

α-частица налетает на атомное ядро, энергия ее маленькая, то рассеяние описывается формулой Резерфорда:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{z_1 z_2 e^2}{4E}\right)^2 \frac{1}{sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

Зависит от z_1 заряда налетающей частицы (это 2), от z_2 заряда ядра (это золото), на котором происходит рассеяние, от энергии налетающей частицы E, а $sin^4 \frac{\theta}{2}$ определяет, что ядро точечное.

α- частица – это частица со спином 0. Ядро со спином 0. α- частица имеет маленькую энергию, несколько МэВ (5-6) в опыте Резерфорда, масса α- частицы маленькая. α- частица видит массивное ядро, на котором она рассеивается, не сдвигая его с места. В результате получаем рассеяние на точечном рассеивающем центре.

Упругое рассеяния электрона на ядрах. Формула Мотта.

Беру электроны, хочу узнать, как устроено ядро.

Формула Мотта:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Мотт}} = \left(\frac{Ze^2}{2E}\right)^2 \frac{1}{sin^4 \frac{\theta}{2}} \frac{cos^2 \frac{\theta}{2}}{\left(1 + \frac{2E sin^2 \frac{\theta}{2}}{mc^2}\right)}$$

Отличие рассеяния электронов от рассеяния α- частиц на точечном нуклоне будет в двух параметрах. Электрон имеет спин. Если он рассеивается и рассеивается назад, то должен произойти переворот спина. Переворот спина будет подавлен членом $cos^2 \frac{\theta}{2}$. По сравнению с формулой Резерфорда появляется дополнительный член (в скобках в знаменателе). Этот член описывает, что энергия электрона может составлять очень большую величину – ГэВ, и тогда налетающая частица будет сдвигать протон, частицы, на которых она рассеивается. Если энергия налетающей частицы будет гораздо меньше массы ядра, на котором происходит рассеяние, то этот член обнулится. В этой формуле

2E, в формуле Резерфорда – 4E. В классической физике энергия частицы $\left(\frac{mv^2}{2}\right)$, в квантовой - mc^2. Отсюда двойка исчезает. Дополнительно к формуле Резерфорда учли спин, то, что частица может взаимодействовать с ядром и его сдвигать, у ядра получается отдача. Пока что не учли, что рассеивающая частица имеет размер. Пока считаем, что она имеет нулевой размер.

Берем эксперимент: берем электроны, рассеиваем. Видим, что сечение отличается от того, что дает формула Мотта. Различия связаны с тем, что до сих пор мы говорили, что ядро точечное. На самом деле оно неточечное. Когда электрон налетают, видят отдельные фрагменты внутри этого ядра, рассеиваются на этих фрагментах, поэтому появляется формфактор. Фактор формы ядра.

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{экс}} = |F(q^2)|^2 \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Мотт}}$$

Измеряя сечение рассеяния под разными углами, зная, как должно происходить рассеяние на точечном ядре, получаем представление о том, как распределена материя внутри атомного ядра.

Зарядовые распределения и соответствующие им формфакторы.

Распределение заряда $\rho(r)$		Формфактор $F(\vec{q}^2)$	
точечное	$\delta(r)$	1	константа
экспоненциальное	$\rho_0 e^{-\frac{r}{a}}$	$\left(1+\frac{\vec{q}^2a^2}{\hbar^2}\right)^{-2}$	дипольный
Гауссово	$\rho_0 e^{-\left(\frac{r}{a}\right)^2}$	$e^{-\frac{\vec{q}^2a^2}{4\hbar^2}}$	Гауссов
однородная сфера:	ρ_0 при $r \le R$, 0 при $r > R$	$\frac{3}{\alpha^3}(Sin\alpha - \alpha Cos\alpha)$, где $\alpha = \lvert\vec{q}\rvert R/\hbar$	осциллирующий,

Измеряя величину формфактора, я определяю, как распределена материя внутри ядра. Это новое представление о том, как устроено атомное ядро. Имеем картинку (Рисунок 202).

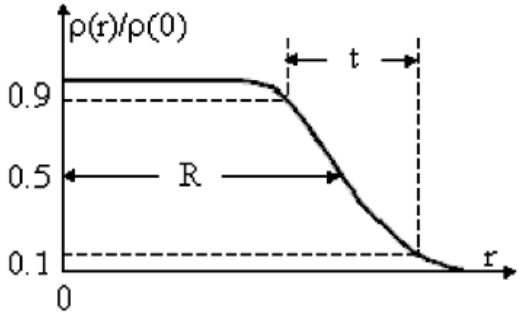


Рисунок 70. Распределение плотности ядерной материи внутри ядра.

Размер атомного ядра определяется радиусом атомного ядра – это расстояние, на котором плотность ядерной материи уменьшается в 2 раза. Радиус атомного ядра дается формулой: $R = 1{,}2A^{1/3}$.Все атомные ядра имеют периферию t. Тяжелые ядра, у

которых плотность ядерной материи изменяется от 0,9 до 0,1. Эта ширина составляет примерно одинаковую величину для всех атомных ядер t =2,5 Фм.
Плотность распределения ядерной материи определяется формулой:

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + exp[(r - R)/a]}$$

ρ_0 – плотность в центре ядра.

Столкновения релятивистских частиц

До сих пор мы говорили об относительно простых вещах, о том, что есть энергия частиц, которая близка к порогу реакций – 5 МэВ, 10 МэВ, изучаем возбужденные состояния ядер.

Но что будет, если энергию столкновения возьмем очень большую? Чтобы не тратить впустую энергию, делают столкновение частиц, чтобы вся энергия уходила в образование новых частиц. В ЦЕРНе был построен ускоритель, который заглублен под городом. Это очень сложное образование (Рисунок 203).

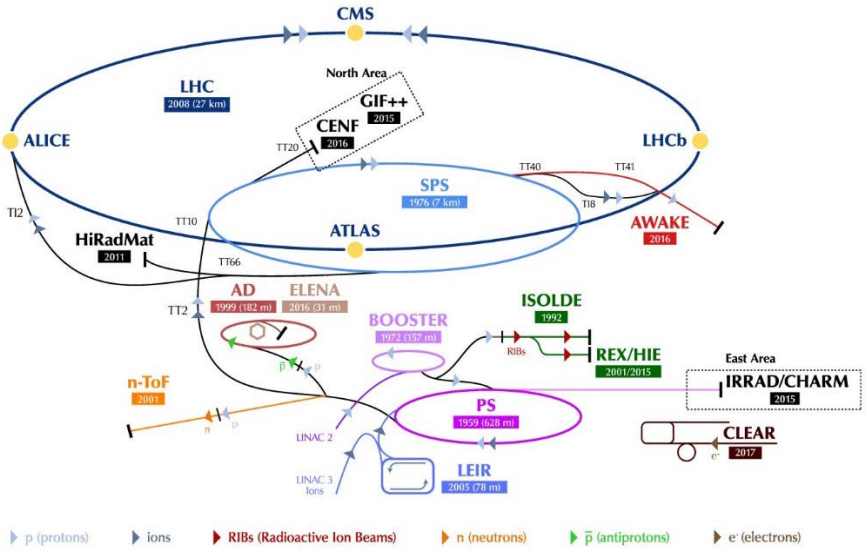


Рисунок 71. Ускорительный комплекс ЦЕРН

Начинается ускорение протонов, затем идет ускоритель для ускорения ядер свинца (частицы имеют энергию 0,3с), дальше они попадают в предварительный ускоритель, здесь имеют энергию 0,87с, из него попадают в еще 2 ускорителя, и в последнем ускорителе получают энергию 0,9999999с. Отличие в 9 знаке от скорости света. Частицы ускоряют, сталкивают. Длина тоннеля 27 км, секции ускорителя создают переменное поле.

Каждый раз, когда протоны или ядро попадают, они получают импульс, и с новой энергией попадают дальше, чтобы пучок не разваливался, следом стоят секции, в которых происходит фокусировка частиц, магниты квадрупольные стоят. В четырех точках пучки максимально сжаты, в этих точках находятся детекторы ATLAS. В него входят 2 пучка, происходит столкновение. Частицы, которые сталкиваются, вылетают и

оставляют следы в камерах, создают ионизацию. Те частицы, которые имеют маленькие ионизационные потери, вылетают и регистрируются во внешней части. Детекторы устроены так, чтобы определить все частицы, которые там появляются. Для каждой частицы нужно определить энергию, импульс. Когда знаю энергию и импульс, могу определить массу частицы. Зная, как она искривляется в магнитном поле, могу определить заряд частицы. Второй детектор – CMS.

Столкнулись 2 ядра, свинец плюс свинец. Детектор Алиса измерил энергии и импульсы каждой из частиц. При этом происходит образование кварк-глюонной плазмы. В начальный момент никаких частиц нет, есть смесь кварков и глюонов. По мере того, как они отодвигаются из точки взаимодействия, кварки и глюоны образуют адроны, мезоны и так далее, все это разлетается. Каждую частицу тщательным образом измеряем. На этапе, когда использовали пузырьковые камеры, частиц было мало известно. Сейчас мы вышли на другой уровень. Вначале глазом смотрели на частицы, потом это стало невозможно. Были построены машины, которые рассматривали фотографии и определяли, все ли получилось. Если получилось, то картинки выбрасывали. Если не сходились импульсы, то садился человек, смотрел законы сохранения, энергии, импульса, не потеряли ли нейтральную частицу, которая не измерилась.

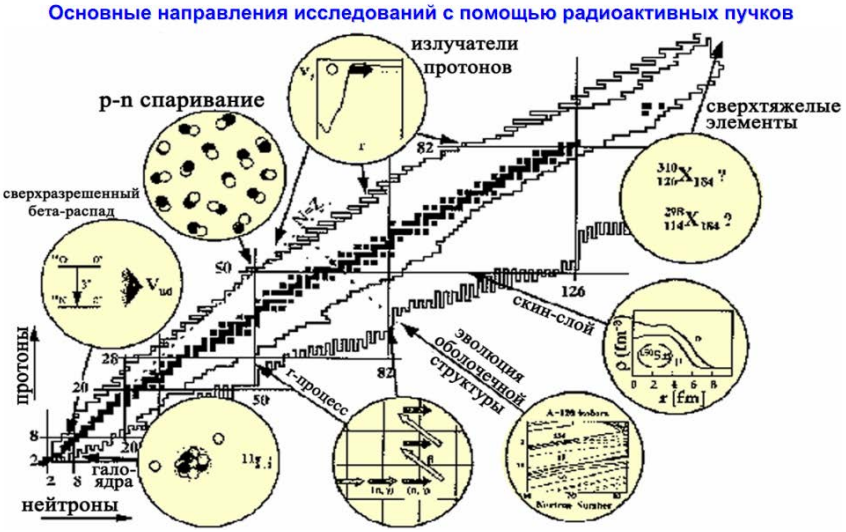


Рисунок 72. Основные направления исследований с помощью радиоактивных пучков

Мы научились ускорять не только стабильные частицы, но и научились получать пучки радиоактивных ядер (Рисунок 268). Тем самым получаем информацию о ядрах, которые были далеко от полосы β-стабильности. Получаем радиоактивное ядро, ускоряем его, как предложил Резерфорд, сталкиваем, смотрим, куда все это разлетается, как разлетается. Тем самым получаем представление о том, как взаимодействуют ядра, сильно перегруженные протонами, нейтронами.

Лекция 12. Деление атомных ядер

История

1934 год – Ферми решил получать новые тяжелые трансурановые элементы. Идея заключалась в том, чтобы взять самое тяжелое ядро ^{238}U, и облучить его нейтронами. Соотношение N/Z изменилось, есть надежда, что избыток нейтронов превратится в протон, и Z на 1 изменится. Он делал эти эксперименты, облучая уран тепловыми нейтронами. Обнаружил среди продуктов распада много радиоактивных элементов. Периоды определить нельзя. Определили период, поставили – не ложится по химическим свойствам. До тех пор, пока в 1939 году немецкие химики Ган и Штрассман не обнаружили среди продуктов реакций барий. (Z=56). Реакции (n,p), (n,α), (n,γ), что-нибудь легкое вылетит, дейтрон. Ган и Штрассман нашли далеко отстоящее ядро. В этом же году Мейтнер и Фриш, сказали, что это происходит новый тип реакций: ядро урана делится на 2 сравнимых по массе осколка. Они впервые объяснили, что под действием нейтронов происходит деление урана на сравнимые по массе осколки. Бор и Уилер дали количественную интерпретацию деления ядра, введя параметр деления. В том же году Френкель развил капельную теорию деления ядер под действием медленных нейтронов. Сцилард, Вигнер, Ферми, Уилер, Жолио-Кюри, Зельдович, Харитон обосновали возможность протекания в уране цепной ядерной реакции деления. Впервые Сцилард в 1934 году выдвинул идею цепной ядерной реакции. 1939 год – началась вторая мировая война, и все материалы по ядерной физике из журналов исчезли. Дальше в 1940 г Флеров и Петржак открыли явление спонтанного деления ядер урана. В 1942 году Ферми построил первый ядерный реактор. В 1946 году Курчатов построил первый ядерный реактор в СССР. 1945 год – ядерный взрыв Хиросима, Нагасаки. В 1954 году запустили первую атомную электростанцию в Обнинске.

Удельная энергия связи ядра

Почему атомные ядра могут делиться? Вспомним удельную энергию связи ядра.

Это энергия связи ядра, деленная на массовое число A: $\varepsilon = W/A$. Энергия связи ядра:

$$W(A,Z) = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \rho \frac{(A/2 - Z)^2}{A} + \delta A^{-3/4}$$

α – это объемная энергия. Ядерные силы короткодействующие, и каждый нуклон взаимодействует только со своими соседями, поэтому αA. Нуклоны, которые ближе к поверхности, имеют соседей только с одной стороны, поэтому поверхностную энергию нужно вычесть из этой величины (второй член). Кулоновская энергия отталкивания протонов $\frac{Z^2}{A^{1/3}}$, кулоновские силы охватывают весь объем, они дальнодействующие. Энергия симметрии, она непосредственно из капельной модели не следует, объясняется в модели ядерных оболочек: протоны и нейтроны являются фермионами, частицы со

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

спином ½, поэтому имеются потенциальные ямы. Одна яма с протонами, другая заполняется нейтронами, поэтому ядру наиболее выгодно сделать так, чтобы энергия Ферми была примерно одинаковая. Это четвертый член в формуле. Еще один момент связан с энергией спаривания нуклонов. Это свойство ядерных сил, которое заключается в том, что 2 тождественных частицы (два протона или два нейтрона), то они спариваются так, чтобы проекции спинов всегда были направлены в противоположные стороны. Это связано с тем, что ядерные силы короткодействующие. Поэтому, чем ближе две частицы подойдут друг к другу, тем выгоднее, потому что ядро будет более компактное. Что такое проекция спина направлена в противоположную сторону: есть ядро, крутится один нейтрон, для того чтобы орбиты второго нейтрона пересекались максимально, он должен крутиться в противоположную сторону. Тогда орбиты полностью перекрываются. Проекция спина тут направлена в одну, а тут в другую стороны. В конце стоит член, который описывает парное взаимодействие. Коэффициенты $\alpha, \beta, \gamma, \rho, \delta$ - они были подобраны так, чтобы максимально близко описать экспериментальные значения энергий связи атомных ядер.

Если сложить все составляющие удельной энергии, то получим результирующую энергию связи. Когда идем от легких ядер к более тяжелым, удельная энергия связи нарастает, достигает максимума в районе железо, медь, кобальт. Потом начинает спадать, потому что начинает увеличиваться кулоновская энергия. Дальше спадает потому, что поверхностная энергия играет большую роль. Объемная энергия пропорциональна объему ядра, а поверхностная - пропорциональна поверхности.

Если взять 2 ядра и соединить между собой, то у меня удельная энергия связи увеличится. Если возьму ядро и разделю его на 2 части, это и есть как раз деление ядра, то энергия связи увеличится. Разность энергий выделится.

Какая же энергия будет выделяться?

Будем исходить из простой модели. Ядро делится так, чтобы получались 2 симметричных осколка. Это наиболее вероятный процесс. Два осколка, у которых массовое число рано A/2, A – масса начального ядра. Заряд каждого из осколков будет Z/2. Тогда энергия, которая выделяется при делении, будет определяться: потенциальной поверхностной энергией осколков и кулоновской энергией.

$$Q_f = 2W\left(\frac{A}{2},\frac{Z}{2}\right) - W(A,Z) \approx \left[E_{\text{пов}}(A,Z) + E_{\text{кул}}(A,Z)\right] - 2\left[E_{\text{пов}}\left(\frac{A}{2},\frac{Z}{2}\right) + E_{\text{кул}}(\frac{A}{2},\frac{Z}{2})\right]$$

$$= \beta\left[A^{2/3} - 2\left(\frac{A}{2}\right)^{2/3}\right] + \gamma\left[\frac{Z^2}{A^{1/3}} - 2\frac{(Z/2)^2}{(A/2)^{1/3}}\right]$$

$$= \beta A^{2/3}\left(1 - \sqrt[3]{2}\right) + \gamma\frac{Z^2}{A^{1/3}}\left(1 - \frac{1}{\sqrt[3]{4}}\right) \approx 0{,}37\beta\frac{Z^2}{A^{1/3}} - 0{,}26\gamma A$$

Одна величина увеличивается, другая уменьшается. Делению выгодно, когда эта величина будет больше нуля.

$$0{,}37\beta\frac{Z^2}{A^{1/3}} - 0{,}26\gamma A > 0$$

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

$$\frac{Z^2}{A} > \frac{0{,}26}{0{,}37}\frac{\beta}{\gamma} = \frac{0{,}26}{0{,}37}\cdot\frac{17{,}2}{0{,}72} \approx 17$$

$\frac{Z^2}{A}$ называется параметром деления. Деление возможно для всех ядер с A> 90. Это означает, что все ядра, начиная с Z примерно 40 должны делиться. Но они не делятся, делятся только тяжелые ядра. Деление выгодно только для тяжелых ядер и определяется параметром деления.

Механизм деления.

Будем исходить из того, что ядро сферически-симметричное. В квантовой системе существует соотношение неопределенности, поэтому всегда ядро дрожит, в нем происходят маленькие колебания, $\Delta E \Delta T \approx \hbar$. Представьте себе, что ядро в результате этих колебаний изменило свою форму, начало вытягиваться (Рисунок 270). По мере того, как оно вытягивается, кулоновские силы пытаются его еще дальше развалить, поверхностных сил не хватает, чтобы стянуть его назад. В результате образуется перетяжка, осколки друг от друга отталкиваются, и теперь происходит разрыв перетяжки, получаются 2 осколка. Механизм деления происходит под действием нейтронов. Нейтрон попал в ядро, образовалось ядро с массовым числом (A+1), и такие процессы в нем происходят. При этом один нейтрон влетел, ядро перегружено нейтронами, с осколками летят нейтроны.

Посмотрим, что происходит, когда ядро сферической формы начинает приобретать форму эллипсоида. Поверхностная энергия меняется вот так:

$$\widetilde{E_{\text{пов}}} = E_{\text{пов}}\left(1 + \frac{2}{5}\varepsilon^2\right)$$

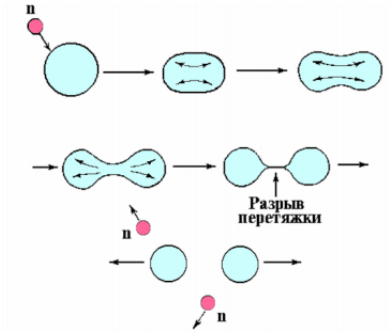


Рисунок 73. Механизм деления ядра

$E_{\text{пов}}$- поверхностная энергия сферического ядра, ε- параметр деформации. Когда происходит деформация, поверхностная энергия увеличивается, потому что площадь поверхности эллипса при данном объеме будет больше. А кулоновская энергия будет уменьшаться, потому что заряды теперь находятся на большем расстоянии друг от друга.

$$\widetilde{E_{\text{кул}}} = E_{\text{кул}}\left(1 - \frac{1}{5}\varepsilon^2\right)$$

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Энергия деления Q_f. Барьер деления B_f

Возьмем простейший случай, когда делится ядро урана 236. Ядро урана 235 захватило нейтрон, появилось ядро урана 236, оно разделилось так, что появилось ядро ксенона 140 и стронция 96. Эти два ядра – наиболее вероятное деление этого ядра. Они образовались. При этом кулоновская энергия уменьшается: вначале она была 980 МэВ, а стала 620 МэВ.

Поверхностная энергия увеличилась: была 660 МэВ, стала – 820 МэВ. Разность, которая получается, это энергия, которая выделяется при делении: 820-620 ≈200 МэВ.

Суммарная кулоновская и поверхностная энергия ведет себя так (Рисунок 204). Вначале она нарастает при увеличении размера ядра, а потом она спадает. Было 1640МэВ, стало 1440 МэВ. Те же самые 200 МэВ.

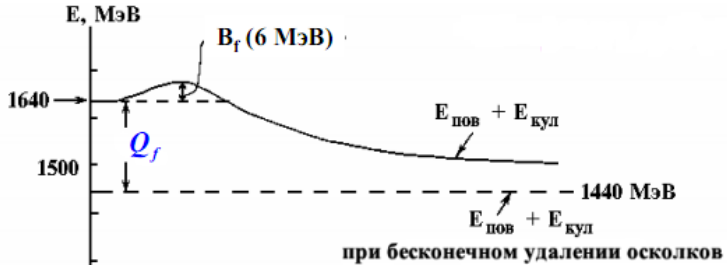


Рисунок 74. Суммарная кулоновская и поверхностная энергии

Почему ядра мгновенно не делятся? Потому что когда начинаете деформировать ядро, возникает барьер деления. Ядро должно через этот барьер пройти. Это задерживает процесс деления. Чтобы деление происходило мгновенно, нужно в ядро внести энергию больше барьера деления ($B_f = 6$МэВ).

Посмотрим, как себя ведет параметр деления $\frac{Z^2}{A}$.

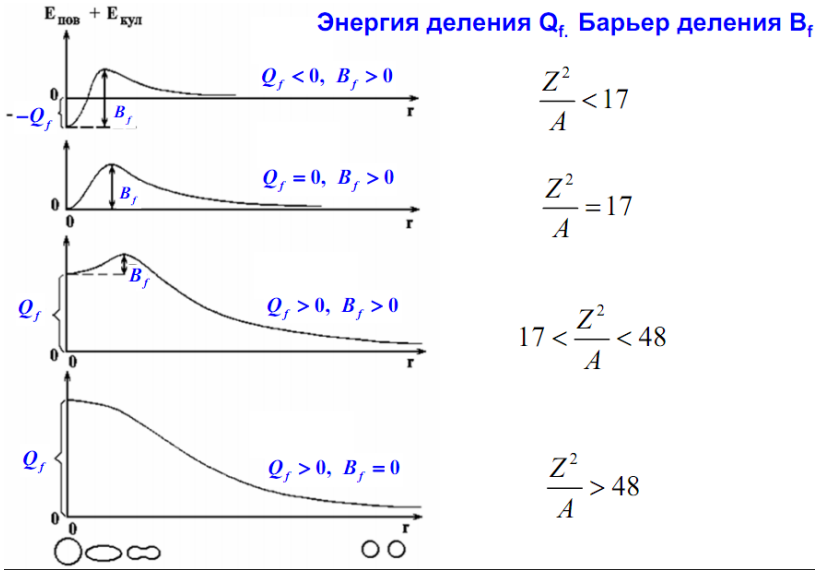


Рисунок 75. Связь энергии деления и параметра деления

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Если параметр деления $\frac{Z^2}{A} < 17$, то энергия деления отрицательна, потенциальный барьер деления высокий. Деление возможно, если в ядро внесем колоссальную энергию. При $\frac{Z^2}{A} = 17$, отрицательная величина исчезла, она стала равна нулю, но барьер деления остался. Энергия деления – ноль, барьер деления – положительная величина. Будем увеличивать $\frac{Z^2}{A}$ от 17 до 48, точка начнет подниматься, энергия деления величина положительная, барьер деления положительный.

Если параметр деления сделаю больше 48, то точка поднимется еще выше, энергия деления положительная, барьер деления равен нулю, ядра должны мгновенно делиться. Это означает, что если исходим из капельной модели ядра, то никаких ядер, которые имеют параметр деления $\frac{Z^2}{A} > 48$, быть не должно. Они должны делиться. Мы исходили из того, что ядра делятся примерно пополам. Посмотрим, что происходит на самом деле.

Есть ядро урана 235, оно захватило нейтрон, превратилось в ядро урана 236, он разделился на 2 осколка: стронций и ксенон, при этом 2 нейтрона выделились. Это означает, что эти 2 нейтрона пойдут и разделять дальше ядра урана 235 (вот она, цепная реакция деления, потому что число нейтронов в конце больше, чем в начале), а осколки получились такие.

$$n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{236}_{92}U \rightarrow {}^{95}_{38}Sr + {}^{139}_{54}X + 2n$$

Это симметричное деление (240:2=120). На самом желе, это деление асимметричное, есть легкий и тяжелый осколки. Почему деление такое?

У тяжелого осколка массовое число 139 и 54. Помните магические числа? Магические числа соответствуют ядрам, которые наиболее сильно связаны. Раз оно сильнее связано, то энергия будет выделяться больше. 54 близко к 50, отнимаем 139-54=84 – это близко к 82. Получаем ядро, близкое к магическому, ксенон, а остатки, которые остались, подобрало ядро стронция.

Ядро делится несимметрично, потому что работают магические числа. Наиболее сильно связаны ядра, которые близки к магическим.

Что будет происходить, если я буду делить не это ядро, а другое.

Отношение легкого осколка к тяжелому: $\frac{A_л}{A_т} \approx \frac{2}{3}\ \frac{Z_л}{Z_т} \approx \frac{2}{3}$

Давайте делить ядра, которые имеют массу больше урана: 240, 245, 260. Если та модель верна, что образуется ядро, близкое к дважды магическому ядру, а остальное подбирает осколок, то картина должна выглядеть так (Рисунок 206): тяжелая группа должна быть все время примерно одинаковой, составляет величину примерно 138, а легкая группа, весь остаток, который подбирает ядро, она линейно растет с увеличением массы делящегося ядра.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

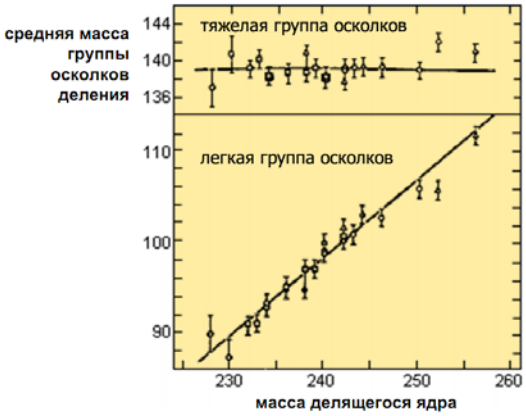


Рисунок 76. Зависимость средних масс тяжелых и легких групп осколков от массы делящегося ядра.

Согласно модели, что мы создали, сначала работают оболочки (ядра, близкие к магическим), деление происходит так, что доминирует ядро, близкое к магическим числам. Картинка экспериментально подтверждается.

Спектр нейтронов деления

Ядро разделилось, вылетел нейтрон. Какой спектр нейтронов будет наблюдаться? Здесь отложена энергия нейтронов, в миллионах эВ, шкала логарифмическая (Рисунок 207). По оси x отложена энергия нейтронов в МэВ. Нейтроны выделяются с энергиями от самых маленьких до десяти МэВ. Максимум энергии расположен в районе 1 МэВ.

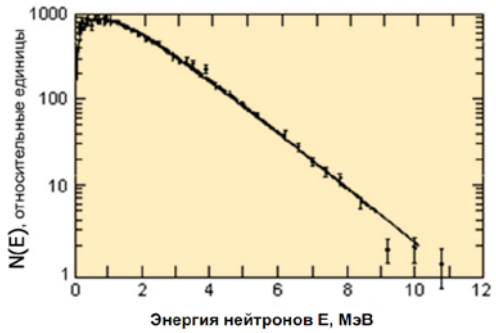


Рисунок 77. Спектр нейтронов деления

Изотопы урана

В основном вы знаете, что делятся изотопы урана. Если взять естественную смесь изотопов урана, как это существует в природе, то оказывается, что существует в большом количестве уран 235 и 238. Урана 235 в природе 0,72 %, урана 238 – 99,28%.

Получилось это потому, что число изотопов одного и второго урана было примерно одинаковое, но период полураспада изотопа урана 235 - $T_{1\backslash 2} = 7{,}0 \cdot 10^8$ лет, а время образования этих ядер равно времени существования Вселенной, в результате

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

они образовались и быстро распадаются. А эти изотопы, уран 238, живет гораздо дольше $T_{1\backslash 2} = 4{,}5 \cdot 9$ лет, потом происходит альфа-распад в обоих случаях.

Возьмем ^{235}U, присоединяем к нему нейтрон. Получается ^{236}U в возбужденном состоянии. Энергия возбуждения составляет 6,5 МэВ, это энергия присоединения нейтрона к ядру. Барьер деления составляет 6 МэВ. Если к урану 235 присоединяем нейтрон, то сразу оказываюсь над барьером деления, и уран 236 может делиться. Но этого изотопа мало.

Берем ^{238}U. Барьер деления составляет 7 МэВ, поэтому, если взять ^{238}U и присоединить к нему нейтрон, то я оказываюсь при энергии 6 МэВ, а барьер составляет 7 МэВ. Чтобы ядро разделилось нужно, чтобы нейтрон имел энергию хотя бы 1 МэВ. Нейтроны с энергией меньше 1 МэВ делить ^{238}U не будут.

Спектр нейтронов непрерывный, имеет максимум в районе 1 МэВ, тянется до 10 МэВ. Запомните, что нейтроны, которые вылетают в результате деления, имеют энергию до 10МэВ, и максимум расположен в районе 1 МэВ.

Число нейтронов деления

Имеем разные ядра. Сколько нейтронов вылетает из разных ядер?

Имеем 4 ядра: ^{234}U, ^{236}U, ^{239}U, ^{240}Pu. На картинке видим среднее число нейтронов для каждого ядра (Рисунок 278). Видим, что чем больше массовое число делящегося ядра, тем большее число нейтронов вылетает в результате деления. Это все зависит от энергии нейтронов, которые вызывают деление.

Почему это так? Нейтрон, попадая в ядро, вносит туда энергию, равную энергии связи ядра плюс кинетическую энергию, которой он обладает. Поэтому чем больше будет его кинетическая энергия, которую он внесет в ядро, тем выше ядро получается над барьером деления, тем быстрее оно делится, тем больше нейтронов в первое мгновение.

Посмотрим на плутоний 240. ν близко к 4,8. Если энергия нейтронов будет равна 0, то величина будет порядка 4 нейтронов (от 3 до 5 нейтронов), которые вылетают при делении плутония 240.

Если взять уран 236. То при малых энергиях число протонов будет 2,5, при больших энергиях будет 4,5. С увеличением A и с увеличением энергии нейтрона, увеличивается число нейтронов, которые вылетают в результате деления.

Радиоактивность осколков деления

При движении к тяжелым ядрам, отношение N/Z увеличивается. В таких легких ядрах типа кальция (20 протонов, 20 нейтронов) отношение числа протонов к числу нейтронов будет 1. Когда идете к урану, Z=92, A=236, отношение N/Z увеличивается. Если берем ядро и быстро делим его пополам, то получаем осколки, в которых отношение числа нейтронов к числу протонов 1,6, но осколки получаются более легкие, характерное отношение N/Z не 1,6, а 1,2-1,3. Ядро пытается эти нейтроны

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

выбросить, они ему мешают. Это те быстрые 2-3 нейтрона, которые вылетают мгновенно, как только ядро делится. Дальше ядро перегружено нейтронами, происходит превращение нейтрона в протон, при этом вылетает электрон и антинейтрино (закон сохранения барионного числа и лептонного числа).

Рассмотрим пример: Уран 235 захватил нейтрон, получились осколки стронций, второй осколок тяжелый, ксенон, вылетели 2 нейтрона.

$$^{235}_{92}U + n \rightarrow {}^{236}_{92}U \rightarrow {}^{95}_{38}Sr + {}^{139}_{54}Xe + 2n$$

$$\frac{N}{Z}=1+0.015A^{2/3}$$

Для легких ядер вторым членом можно пренебречь. По мере того, как N увеличивается, масса увеличивается, соотношение становится примерно 1,6.

Рассмотри осколки: $^{95}_{38}Sr$, массовое число A=95, происходит β-распад, в результате которого массовое число A не меняется, поэтому стронций превращается в иттрий 95, дальше в цирконий 95, ниобий 95, он превращается в молибден. Z меняется: 39-39-40-41-42. Это уже стабильное ядро.

$$_{38}Sr \xrightarrow[24{,}4\ с]{} {}_{39}Y \xrightarrow[10{,}4\ м]{} {}_{40}Zr \xrightarrow[64\ д]{} {}_{41}Nb \xrightarrow[35\ д]{} {}_{42}Mo$$

По мере того, как двигаемся от перегруженных нейтронами ядер к стабильным ядрам, период полураспада увеличивается.

Второй осколок: $_{54}Xe$, тяжелый осколок, массовое число A=139. 54-55-56 - это уже стабильное ядро.

$$_{54}Xe \xrightarrow[39{,}7\ с]{} {}_{55}Cs \xrightarrow[9{,}3\ м]{} {}_{56}Ba \xrightarrow[83{,}1\ м]{} La$$

Имеем ядра, которые в результате деления получаются сильно прегруженными нейтронами. Они пытаются от них избавиться двумя способами: они выбрасывают мгновенные нейтроны или нейтроны превращаются в протоны.

Запаздывающие нейтроны деления ^{87}Kr

Рассмотрим картинку (Рисунок 208). В результате деления образуется ядро бром 87. Оно радиоактивное, в результате β-распада превращается в ядро криптон 87, период полураспада 55,6 с, он распадается на рубидий 87, время распада 86 м, а рубидий превращается в стронций за $5\cdot 10^{10}$ лет. Время существования Вселенной 13,7 млрд. лет. Время сопоставимо со временем существования Вселенной.

Когда бром распадается и превращается в криптон, у него может происходить распад как в основное состояние ($\beta-$ распад), так и на различные возбужденные состояния. Все это тянется до энергии ≈6 МэВ. Если взять ядро криптон 87, то окажется, что энергия отделения нейтрона в нем составляет ≈2 МэВ, поэтому если ядро оказалось в этой области возбуждения (меньше 2,1 МэВ), то у него единственная возможность распасться в результате каскада гамма-квантов. Оно распадается и превращается в соответствии с нижней строкой. Но если он оказался в этой области энергии (выше 2,1 МэВ), то у него есть 2 возможности: каскадный распад как внизу

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

либо может быть выбрасывание нейтронов из ядра. Эти процессы конкурируют между собой.

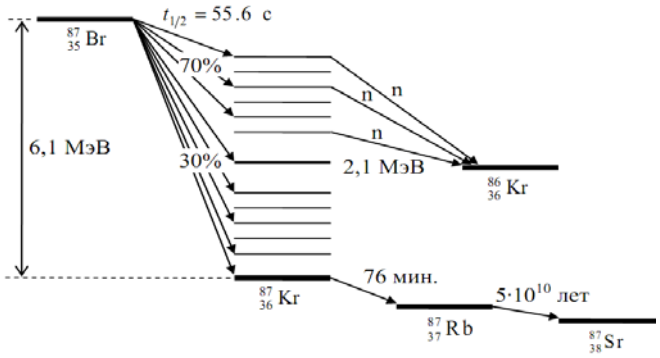


Рисунок 78. Запаздывающие нейтроны деления Kr

Каскадные гамма-переходы происходят за счет электромагнитных процессов. А выбрасывание нейтронов – это процесс сильного взаимодействия. Таким образом, в верхней области будет происходить преимущественно вылет нейтрона из ядра, а в нижней области будет происходить преимущественно распад через испускание гамма-квантов.

Итак: ядро брома распалось. С периодом полураспада 55,6 с оно превращается в ядро криптона, и из него моментально вылетают нейтроны, если энергия достаточная. Такие нейтроны называются запаздывающими. Они запаздывают по отношению к распаду в ядре брома. Ядро ждет, пока произойдет $\beta-$ распад, ждет и мгновенно распадается с испусканием нейтронов. Эти нейтроны играют очень важную роль для управляемой ядерной реакции деления. Если нейтрон выделился мгновенно, то реакция будет идти мгновенно, и произойдет взрыв. А за счет этих нейтронов, запаздывающих, мы можем управлять реактором.

Энергия деления

Имеется энергия деления. Она составляет 200 МэВ. Посмотрим, как эта энергия делится между продуктами распада.

Продукты распада	Энергия деления, МэВ
Кинетическая энергия осколков	167
Мгновенные нейтроны	5
Электроны β-распада	5
Антинейтрино β-распада	10
Мгновенное γ-излучение	7
γ-излучение продуктов распада	6
Полная энергия деления	200

В основном из 200 МэВ 167 МэВ уходит на кинетическую энергию осколков. 2-4 мгновенных нейтрона уносят 5 МэВ в среднем. Электроны β-распада уносят 5 МэВ, антинейтрино β-распада – 10 МэВ, мгновенное γ- излучение - 7 МэВ, γ- излучение – 6 МэВ.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Энергия деления уходит на то, что возникают 2 осколка, которые с колоссальной скоростью отлетают друг от друга, создавая ионизацию окружающей среды.

Возьмите 2 осколка, которые получаются, сведите их до состояния, чтобы они коснулись друг друга, увидите, что энергия, которая нужна, чтобы из бесконечности их приблизить, как раз 170 МэВ.

^{235}U 0,72% $T_{1/2} = 7{,}0 \cdot 10^8$ лет, α-распад

^{238}U 99,28% $T_{1/2} = 4{,}5 \cdot 10^9$ лет, α-распад

Энергия присоединения нейтрона		Барьер деления	
^{235}U	6.5 МэВ	^{236}U	6.0 МэВ
^{238}U	6.0 МэВ	^{239}U	7.0 МэВ

Рисунок 79. Изотопы урана

В естественной смеси ядер урана 238 в 140 раз больше ядер урана 235. Уран 235 делится в результате присоединения нейтрона любой энергии, а уран 238 будет делиться, только если энергия нейтронов больше 1 МэВ.

Реакции (n,f), (n,n), (n,n') на изотопах ^{235}U, ^{238}U

Рассмотрим на 2 изотопа: ^{235}U, ^{238}U. Когда нейтрон взаимодействует с ядром урана, происходят следующие реакции (Рисунок 210).

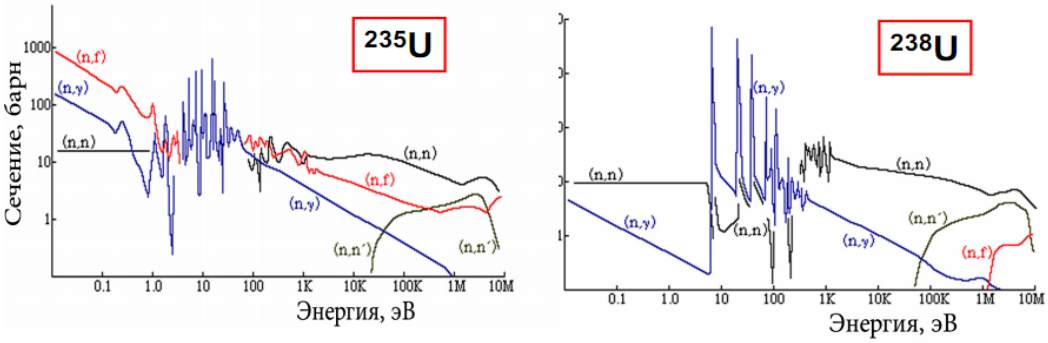


Рисунок 80. Реакции на изотопах урана

Первая реакция – это реакция (n, n) – это реакция упругого рассеяния. Имеется ядро, а него налетел нейтрон, внутренние свойства урана не изменились, нейтрон отлетел как от стенки. При этом нейтрон потерял часть своей энергии.

Есть реакция (n, n'). Если энергия 0,1 эВ, здесь 10 кэВ, то здесь примерно 30-40 кэВ. Нейтрон налетел на ядро, передал ему энергию 40 кэВ, возбудилось какое-то состояние в ядре, нейтрон потерял энергию, и нейтрон поглотился. Если он поглотился, то идет реакция (n,γ). Обратите внимание на эти ужасные синие пики, которые расположены в районе 10 эВ. Дальше реакция (n,γ) спадает.

Таким образом, происходят реакции, которые нам совершенно не нужны: упругое рассеяние, реакция (n,n'), реакция (n,γ), в результате которой нейтрон вообще

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

потерян. Одна реакция, которая нам нужна – это реакция (n,f), которая обозначена красным. Она начинается с самых малых энергий, имеет колоссальное сечение в барнах. (1000 барн), дальше она спадает. Для урана 238 реакция (n,f) идет только на высоких энергиях, это энергии больше 1МэВ. Таким образом, можем составить такую величину: отнести полезную нам реакцию (n,f) (поглотился нейтрон, произошло деление, f – означает fission) к реакциям (n,f) и (n,γ):

$$\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{nf}+\sigma_{n\gamma}}$$

Цепная реакция деления

Возьмем естественную смесь изотопов урана. Делящееся ядро урана 234, уран 236 и плутоний 240. Если нейтроны имеют тепловую жнергию, то есть меньше 1 эВ, то величина ν (число нейтронов, образующихсяза один акт деления) будет составлять 2,52 для урана 234, то есть вылетает в среднем 2-3 нейтрона, в уране 236 – 2,47, и максимальна в плутонии 240 – 2,91. Не все нейтроны, которые вылетают, приводят к делению. Часть нейтронов могут в реакторе поглотиться в каких-то веществах. Поэтому вводится коэффициент ν (коэффициент полезного действия). Он несколько меньше, чем σ_{nf}.

$$\eta = \nu\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{nf}+\sigma_{n\gamma}}$$

Это есть сечение нейтронов, которые получаются, умноженное на коэффициииент полезного действия ν. ν всегда больше, чем η. Это для тепловых нейтронов. Это нейтроны, которые находится в окружающем нас пространстве, есть температура, частицы двигаются, если нейтроны будут налетать на молекулы воздуха и то отдавать энергию, то получать энергию от молекул воздуха, будут находиться в тепловом равновесии со средой. Быстрые нейтроны – нейтроны с энергией 1 МэВ.

Деление естественной смеси изотопов урана быстрыми нейтронами. $^{235}_{92}U$

Возьмем изотоп урана 235. Чистый металл, состоит из двух изотопов – уран 235 и 238. Будет содержать в процентном соотношении 99,28% изотопа $^{238}_{92}U$ и 0,72% изотопа $^{235}_{92}U$.

Можем получить среднее сечение. Оно будет определяться реакцией (n,f) на $^{235}_{92}U$, реакцией (n,γ) на $^{235}_{92}U$ и этими же реакциями на $^{238}_{92}U$:

$$\bar{\sigma} = \sigma_{nf}^{235} + \sigma_{n\gamma}^{235} + 140(\sigma_{n\gamma}^{238} + \sigma_{nf}^{238})$$

В связи с тем, что $^{238}_{92}U$, получаем коэффициент 140. Коэффициент η будет определяться числом нейтронов, которые соответствуют одному акту деления, умноженному на полезную реакцию – сечение реакции на уране 235, и деленное на $\bar{\sigma}$.

$$\eta^{235} = \frac{\nu\sigma_{nf}^{235}}{\sigma_{nf}^{235} + \sigma_{n\gamma}^{235} + 140(\sigma_{nf}^{238} + \sigma_{n\gamma}^{238})}$$

Для быстрых нейтронов ν=2,65, сечения составляют σ_{nf}^{235}=1,2-1,3 барн, $\sigma_{nf}^{238} =$ 0,6 барн, $\sigma_{n\gamma}^{235} \approx \sigma_{n\gamma}^{238} \approx 0{,}1$ барн. Барн =10^{-24}см^2. Ядро урана 238 имеет примерно 6·10^{-13}Фм. Если подставить все числа, то коэффициент деления урана 235 составляет $\eta_{\text{быстр}}^{235} \approx 0{,}03$.

Деление естественной смеси изотопов урана быстрыми нейтронами. $^{238}_{92}U$

При делении его быстрыми нейтронами, $^{238}_{92}U$ будет делиться, если энергия нейтронов будет больше 1,4 МэВ, при тепловых энергиях он не делится. Подставляем в формулу компаненты для $^{238}_{92}U$:

$$\eta_{\text{быстр}}^{238} = \frac{140 \cdot \nu\sigma_{nf}^{238}}{\sigma_{nf}^{235} + \sigma_{n\gamma}^{235} + 140(\sigma_{nf}^{238} + \sigma_{n\gamma}^{238})} \cdot 0{,}6 \cdot \frac{1}{5} \approx 0{,}27$$

Примерно 0,6 нейтронов будет находиться в области энергии от 1,4 до 10 МэВ, дальше они, двигаясь в этой среде, будут замедляться, перейдут через энергию 1,4 МэВ, станут для деления бесполезными, только 1/5 от этого спектра нейтронов будет вызывать деление. Поэтому величина будет составлять 0,27. (0,27+0,03)=0,3 – и деление в естественной смеси урана получается меньше 1.Таким образом, если вы имеете кусок урана 238, положили перед вами. Какойбы объем вы не взяли, деления не будет, ядерного взрыва не будет.

Деление естественной смеси изотопов урана тепловымими нейтронами

Под действием тепловых нейтронов будет делиться только $^{238}_{92}U$. Запишем то же самое соотношение:

$$\frac{\sigma_{nf}^{235}}{\bar{\sigma}} = \frac{\sigma_{nf}^{235}}{\sigma_{nf}^{235} + \sigma_{n\gamma}^{235} + 140(\sigma_{nf}^{238} + \sigma_{n\gamma}^{238})}$$

Подставим сечение под деуствием тепловых нейтронов

$$\eta^{\text{ест}} = \frac{\nu\sigma_{nf}^{235}}{\sigma_{nf}^{235} + \sigma_{n\gamma}^{235} + 140(\sigma_{nf}^{238} + \sigma_{n\gamma}^{238})}$$

Для тепловых нейтронов величина ν=2,47, сечение $\sigma_{nf}^{235} = 580$ барн. У тепловых нейтронов увеличилась длина волны и, соответственно, увеличилось сечение. $\sigma_{n\gamma}^{235} =$ 112 барн, $\sigma_{n\gamma}^{238} = 2{,}8$ барн, $\sigma_{nf}^{238} = 0$. Среднее число вторичных нейтронов на один захват нейтрона делязимися ядрами составляет $\eta_{\text{тепл}}^{\text{ест}} = 1{,}32 > 1$.

Мы знаем, что нейтроны рождаются не тепловыми, а их спектр от лепловых до 10 МэВ. Нейтроны родились в процессе деления, нужно сделать их тепловыми. Родился нейтрон, начал ударяться о ядра урана, ядро урана тяжелое, поэтому он должен удариться о нго 200-300 раз, чтобы замедлиться до тепловых энергий. Но когда он подходит к этой области, ему приходит конец: реакция (nγ), нейтрон ударился о ядро урана, захватился, испустился гамма-квант и он потерян. В нужную область нейтрон не доходит.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Нужно придумать что-то, чтобы вызвать реакцию деления. Получили нейтрон, нужно его бережно пронести мимо ядер урана 238 и довести до тепловой энергии.

Имеется ядро большой массы, на него налетает нейтрон. Налетает нейтрон и отражается, теряет малую энергию (закон сохранения энергии и импульса). Для того, чтобы он потерял бошую энергию, мы должны взять как можно менее массивное ядро – водород. Его берут из воды. Взяли, поместили в воду. Родился в результате деления урана нейтрон. Теперь надо сделать так, чтобы он замедлился, не провзаимодействовал с ядрами урана, для этого воды должно быть побольше, чтобы он натыкался на ядра воды, а не на ядра урана. И когда он достиг тепловой скорости, он взаимодействует снова с ураном, и вызывает его деление.

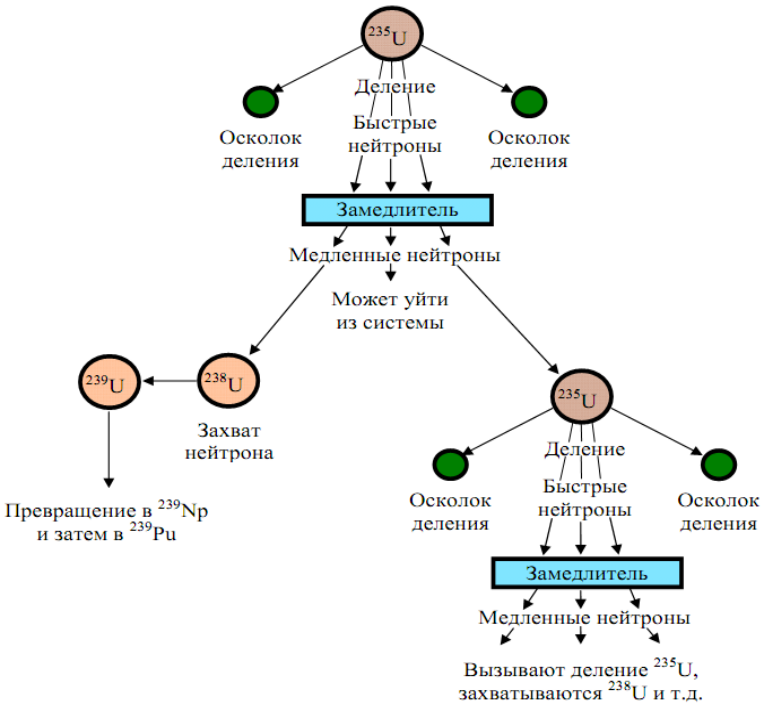


Рисунок 81. Цепная реакция деления на тепловых нейтронах.

Посмотрим, что происходит. Имеется ядро урана 235. Он разделился на 2 осколка, образовались быстрые нейтроны. Вытаскиваем их и помещаем в замедлитель. Эти быстрые нейтроны превращаются в медленные нейтроны. Этот медленный нейтрон может уйти из среды (среда – это соль урана, растворенная в воде). Но если он не уходит из среды, он идет дальше и вызывает деление урана 235 под действием медленных нейтронов, сечение колоссальное. И опять весь цикл повторяется. Но много ядер урана 238, которые не делятся под действием тепловых нейтронов. Но под действием медленных нейтронов они могут захватить медленный нейтрон, ядро урана 238 превращается в уран 239. Уран 239 в результате β-распада превращается в нептуний 239, а нептуний 239 распадается и превращается в плутоний 239. Это и есть оружейный плутоний.

Формула четырех сомножителей

Давайте посмотрим, как будет происходить этот процесс.
Обычно это называют формулой четырех сомножителей.

$$K_\infty = \eta \cdot p \cdot f \cdot \varepsilon$$

Если имеем бесконечную среду, то число вторичных нейтронов, которое будет получаться на 1 акт деления в смеси, будет составлять величину η. После рождения нейтрон должен постараться избежать резонансных захватов ядрами урана 238 в процессе замедления, уйти от резонансных пиков (p- вероятность избежать резонансного захвата). Он стал тепловым. Вероятность поглощения теплового нейтрона (f) ядром горючего (а это уран 235), а не замедлителя, этот коэффициент будет определять, сколько будет вторичных нейтронов. Есть еще добавка ε - коэффициент размножения на быстрых нейтронах, она дает 3%, не больше.
Оценка величин $pf \sim 0{,}5 - 0{,}7$.
Ясно, что должна быть смесь из делящегося материала и замедлителя деления.
Отношение количества ядер урана и замедлителя должно быть такое: $\frac{N_c}{N_u} \approx (2-4) \cdot 10^2$.
Ядер воды, углерода, бериллия должно быть примерно в 200-300 раз больше, чем ядер урана. Тогда в результате деления урана образуются нейтроны, они будут ударяться о ядра замедлителя, замедляться, они будут доходить до тепловых энергий, сечение взаимодействия теплового нейтрона будет больше с ураном 238-239, провзаимодействует, и получим полезную для себя реакцию.

Схема гетерогенного теплового реактора

Имеется объем, в котором находятся стержни, в которых находится смесь урана 235 и 238, стержни – это тепловыделяющий элемент. В нем происходит деление, этот элемент нагревается и отдает свое тепло воде, есть каналы для протока теплоносителя. Есть замедлитель (используют углерод, соединения бериллия и т.д.). Надо научиться управлять реактором. Для этого нужно иметь вещества, которые имеют большое сечение поглощения нейтронов. Представьте, что число нейтронов стало больше 1. Это приведет к тому, что реактор взорвется. Поэтому туда надо опустить вещество, которое будет быстро поглощать нейтроны. Для этого есть стержни регулирующей защиты. Они опускаются, поглощают нейтроны. Обычно это кадмиевые стержни. Опускаем, и реакция начинает затухать, происходит управление потоком нейтронов внутри этого объема. Нужно сделать так, чтобы нейтроны не выходили наружу, а снова возвращались в объем. Для этого ставят отражатели. Нейтроны в объеме вызывают деление, это тепло мы отводим. Так работает тепловой гетерогенный реактор.

В 1954 году в Обнинске была запущена станция. Активная зона имела форму цилиндра диаметром 1,5 м и высотой 1,7 м. Замедлитель был графитовый. Горючее – 130 твелов, в которых было 550 кг обогащенного урана 235 до 5%. Мощность реактора – 5 МВт.

То означает, что в секунду проходило $1{,}5\cdot 10^{17}\ \frac{\text{делений}}{\text{с}}$.

Имеем объем делящегося вещества, урана. Имеем процесс, который происходит внутри объема, и имею поверхность. Нейтроны могут через поверхность уходить. Существует понятие критической массы. Это масса делящегося изотопа, для которой k=1. То есть нейтроны не вытекают из поверхности. Если объем характеризуется радиусом R^3, а поверхность характеризуется R^2, нужно увеличить отношение объема к поверхности, то есть нужно увеличить радиус.

Воспроизводство ядерноо горючего

Какую роль играет уран 238. Его много, он захватывает нейтрон и превразается в уран 239. Через β-распад превразается в нептуний 239 (период полураспада 2,3 мин), нептуний через β-распад (период полураспада 2,4 дня) превращается в плутоний. Плутоний имеем период полураспада $2{,}4\cdot 10^4$лет.

$$n + {}^{238}_{92}U \rightarrow {}^{239}_{92}U \xrightarrow{\beta^-,23\text{ мин}} {}^{239}_{93}Np \xrightarrow{\beta^-,2{,}4\text{ дня}} {}^{239}_{94}Pu \xrightarrow{\alpha,2{,}4\cdot 10^4\text{лет}}$$

Таким образом, если поместить в реактор естественную смесь урана, она будет содержать много урана 238, то мы получаем плутоний, который является ядерным горючим: его можно использовать как в атомных станциях, так и в бомбах.

Наконец, на Земле гораздо больше тория, чем урана. Если брать торий, облучать его нейтронами, то получается изотоп тория 233, через β-распад он преаращается (период полураспада 2,2 мин) в протактиний, затем период полураспада 27 дней и превразается в уран 233, который тоже является отличным ядерным горючим.

$$n + {}^{232}_{90}Th \rightarrow {}^{233}_{90}Th \xrightarrow{\beta^-,22\text{ мин}} {}^{239}_{91}Pa \xrightarrow{\beta^-,27\text{ дней}} {}^{239}_{92}U \xrightarrow{\alpha,1{,}5\cdot 10^5\text{лет}}$$

Если запустить ядерный реактор, то мы получаем возможность вырабатывать ядерное горючее. Он не только расходует вещество, которое делится, но и его нарабатывает. Поэтому очень важная проблема – заглянуть внутрь ядерного реактора и посмотреть, с какой скоростью протекают ядерные реакции, как изотопы нарабатываются. Это можно сделать только посмотрев на нейтрино, которое выделяется в результате деления ядер, и по потоку нейтрино определить мощность, с которой работает реактор. Во всех ядерных реакторах рядом помещены детекторы нейтрино, которые все время записывают, сколько там нейтрино, и мы имеем полный контроль на всех ядерных станциях, на которых производится ядерное топливо, деление происходит и в мирных целях, и в военных. С помошью потока нейтрино мы можем это регулировать.

Ядерный взрыв

Можем использовать энергию деления ядер для выработки электроэнергии, тепловой энергии. Нужно, чтобы ядерная реакция шла, но очень медленно, чтобы все было под контролем. Другая возможность есть в следующем (Рисунок 211). Если взять объем, который будет соответствовать критической массе делящегося вещества.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

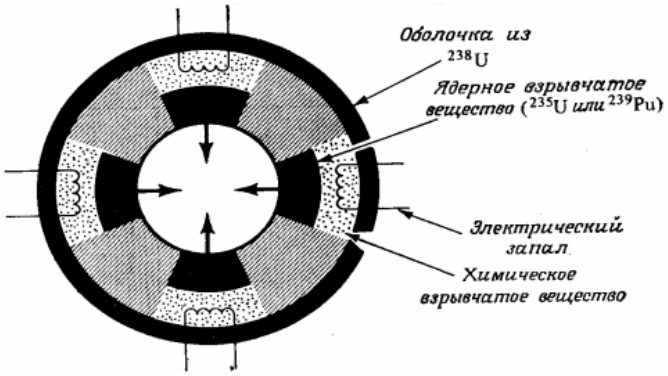


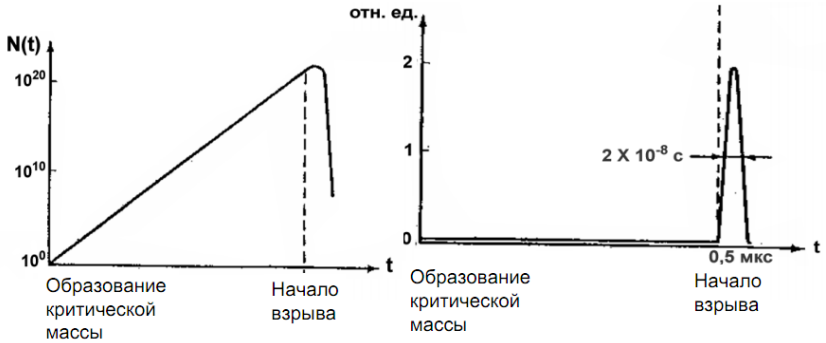
Рисунок 82. Ядерный реактор

Если имеется уран 235, то надо, чтобы внутри объема находилось 50 кг, тогда это мгновенно взорвется. Если у нас плутоний, то для плутония нужно всего 11 кг. Если все находится в критическом объеме, то оно взрывается и выделяется огромная энергия. Но нам нужно, чтобы эта масса взорвалась в определенный момент. Для этого критическая масса переносится сюда, в черную зону. Масса меньше критической, поэтому взрыва не будет. Но, если мы хотим, чтобы она взорвалась, мы помещаем сюда запал из вещества, которое взрывается в результате химической реакции (толуол, например). Эти куски соединятся, и образуется масса. Число нейтронов, которое будет со временем меняться, будет равно:

$$N(t) = N_0 e^{t/\tau}$$

τ— это время, которое нужно нейтрону, чтобы во взрывной смеси от одного ядра урана дойти до другого. Это время 10^{-8}с. При полном делении 1 кг урана выделяется энергия, равная энерговыделению при взрыве 20 кг тротила.

Основная проблема – научиться сводить куски урана. Если свести их несимметрично или еще как-то, то у вас начнется выделение тепла, масса не взорвется одновременно, ее просто разбросает. Не взрыв, а тепловое нагревание, разбросает. Как произошло в Чернобыле: там не произошел ядерный взрыв, а произошел тепловой взрыв.



Зависимость от времени числа нейтронов при ядерном взрыве.

Зависимость от времени энергии ядерного взрыва.

Рисунок 83. Ядерный взрыв

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Здесь логарифмическая шкала (Рисунок 212, слева). Образовалась критическая масса. Число нейтронов со временем растет, есть начало взрыва, дальше взрыв. На правом рисунке образование критической массы, время, в течение которого происходит взрыв, составляет примерно $2\cdot 10^{-8}$ с. От начала образования критической массы до начала взрыва проходит всего 0,5 мкс.

Таким образом, имеется масса, мы ее свели. Происходит примерно 100 циклов. Увеличивается 2^n - 2 – число нейтронов, n-число циклов. Число нейтронов нарастает, и имеем такую картинку.

Термоядерный взрыв

Кроме того, это чисто ядерная бомба – взрыв урана, плутония. Существует еще так называемые термоядерные бомбы. Если взять 2 легких ядра, объединить их, тоже выделяется энергия. Чтобы такая энергия выделялась, нужно чтобы ядра с большой энергией стукнулись друг о друга.

Реакции, которые могут приводить к ядерному взрыву:

$$^2H + {}^3H \rightarrow {}^4He + n + 17{,}59 \text{ МэВ}$$
$$^2H + {}^2H \rightarrow {}^3He + n + 3{,}27 \text{ МэВ}$$
$$^3H + {}^2H \rightarrow {}^4He + p + 18{,}35 \text{ МэВ}$$
$$^2H + {}^2H \rightarrow {}^3He + p + 4{,}03 \text{ МэВ}$$
$$^6Li + n \rightarrow {}^3He + {}^4He + 4{,}78 \text{ МэВ}$$

Проблема в том, чтобы создать высокую температуру, заставить эту реакцию протекать при высокой температуре.

Помещаем ядерный заряд, он взрывается. В результате взрыва повышается температура. В пластмассовом наполнителе есть дейтерид лития, плутониевый запал. В результате взрыва ядерного заряда, возникает колоссальная вспышка света внутри объема, происходит разложение пластмассового наполнителя, создается колоссальное давление. Это давление приводит к тому, что пластинка из дейтерида лития сжимается, нужно чтобы плотность действующего вещества была большой, чтобы нейтрон быстро пробегал от одного ядра к другому. В центре находится плутониевый запал, который тоже под действием высокой температуры начинает сжиматься. Все это приводит к тому, что возникает высокая температура. Чтобы раньше времени это не взорвалось, помещают урановый экран. Поэтому это сдерживает энергию. Если окружить это ураном в естественной смеси, которая легко добывается, то можно получить бомбу, которая имеет колоссальную взрывную силу. Потому что тут получаются быстрые нейтроны, которые вызывают деление периферийной оболочки.
Так работает ядерное оружие.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

Лекция 13. Нуклеосинтез

Возраст Вселенной 13,7 млрд. лет. Мы знаем, что Вселенная расширяется. Характеризуется постоянной Хаббла. Доля антивещества $< 10^{-4}$. Вселенная родилась из состояния с квантовыми числами, равными нулю: электрический заряд 0, лептонный заряд 0, барионный заряд 0. Должны были родиться в равном количестве частицы и античастицы. Частицы есть, античастиц нет. Куда они делись?

Есть величина - отношение числа реликтовых фотонов к числу барионов - $10^9 - 10^{10}$. В 10 млрд. раз число фотонов больше, чем число барионов? Тут кроется ответ на первую загадку. Во Вселенной родились частицы и античастицы. Они между собой аннигилировали, это привело к рождению фотонов. Небольшой перевес частиц над античастицами привел к тому, что мы сейчас живем в мире, а не антимире. У нас существуют барионы. Вначале было большое число частиц и античастиц, они аннигилировали, появились фотоны, в результате мы живем в мире частиц. Важная величина по числу ядер. В основном во Вселенной находится водород. 90% — это водород. 9% — это гелий, а все остальные ядра составляют меньше 0,2%.
Основное вещество во Вселенной – это водород, мало гелия.

Посмотрим на то, как происходит эволюция Вселенной (Рисунок 212).

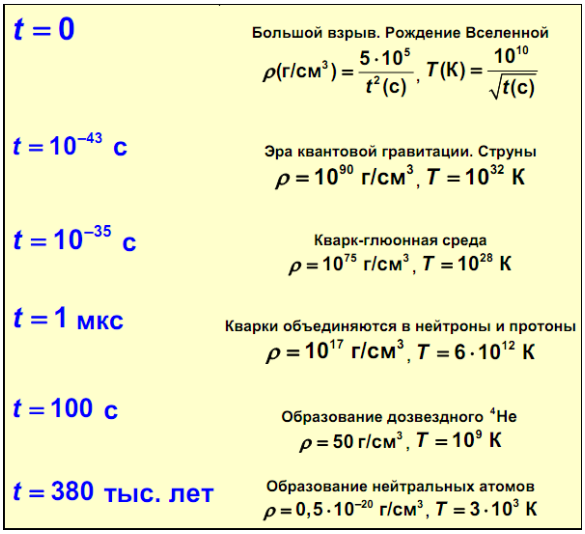


Рисунок 212. Эволюция Вселенной

В самом начале есть целый ряд тонкостей. Но будем исходить из того, что в начале есть Большой взрыв, t=0. Колоссальная температура, рождаются частицы и античастицы, к-мезоны, различные резонансы распадаются за время 10^{-23}с, появились протоны, нейтроны. Вселенная начинает остывать, плотность падает со временем, падает температура. Плотность падает как t^2, а температура падает как $\sqrt{t}$. Это масштаб t=0.

Дальше масштаб t=10^{-43}с. Это эра квантовой гравитации, мы не знаем, что это. До конца теория не построена, это красивая математика, которая не имеет предсказаний, которые мы бы обнаружили. Красота пропорциональна ее сложности.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Теория говорит, что мы живем в 11-мерном пространстве, что нет кварков, а есть одиночная струна, которая движется в этом пространстве, она там изгибается, и каждое колебание струны соответствует частицам – кваркам, лептонам, протонам и т.д. Но пока не подтверждается. t=10^{-43}с. Из кусочков пространства-времени родилось то пространство-время, в котором мы живем.

t=10^{-36}с. Плотность упала сильно. Температура упала. Это состояние кварк-глюонной плазмы. Ничего нет, есть только кварки, между ними ползают глюоны, там же находятся электроны, позитроны. Такая каша, которая потихоньку расширяется и охлаждается.

t=10^{-6}с. Кварки объединяются в нейтроны м протоны. Плотность еще уменьшилась, температура уменьшилась. Образовался гелий звездный, и через 400 .тыс. лет образовались нейтральные атомы. Дело заключается в том, что сначала была очень высокая температура, электроны там летали между протонами и нейтронами, ядер еще не было, температура высокая, фотонов много, поэтому если электрон пытался прицепиться к ядру, то они сразу его отрывали, происходила ионизация. Было состояние ионизации вещества. Дальше по мере того, как температура падала, электроны смогли прицепиться к ядрам, и у нас появились нейтральные атомы.

Дозвездный нуклеосинтез

После того, как температура понизилась, у нас образовалось 2 типа барионов – протоны и нейтроны. Есть электроны и позитроны, нейтрино и антинейтрино. Все это кипит, энергия передается, все находится в стадии термодинамического равновесия. Из закона Гиббса мы знаем, что наиболее вероятны те состояния, которые имеют меньшую энергию. Легче образовать протон, чем нейтрон. Вероятность образования пропорциональна энергии системы, т. е энергии покоя протона и нейтрона.

$$W = Ae^{-E/kT}$$

Отношение числа протонов к числу нейтронов получается:

$$\frac{N_n}{N_p} = \frac{e^{-E_n/kT}}{e^{-E_p/kT}} = e^{-(m_n - m_p)c^2/kT} = \frac{1}{6} = \frac{2}{12}$$

У нас есть 2 нейтрона и 12 протонов. Берем 2 протона и 2 нейтрона, делаю ^4He. Остается 10 протонов. Поэтому, если протоны и нейтроны смогут объединиться, то получим то соотношение, которое нужно: 1/10. Если эта версия правильная, то объединение буде происходить так (Рисунок 213):

Протоны и нейтроны, нейтронов мало, отношение 1/6. Температура падает, и протоны начинают объединяться с нейтронами, образуются дейтроны.

$$p + n \rightarrow {}^2_1H + 2{,}22 \text{ МэВ}$$

Энергия связи дейтрона 2,2МэВ. Если протон объединился с дейтроном, число фотонов 10^9-10^{10}, энергия фотонов большая, он налетает и снова разваливает дейтрон. До тех пор, пока температура не опустится достаточно низко, реакция p+n не идет, потому что энергия связи дейтрона маленькая. Если температура опустилась, то

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

ситуация получается благоприятная. Два дейтрона между собой взаимодействуют, получатся ядра изотопа водорода – тритий и изотоп гелия – гелий 3, выделяется энергия:

$$ {}^2_1H + {}^2_1H \rightarrow \begin{cases} {}^3_1H + p + 4{,}03 \text{ МэВ} \\ {}^3_2H + \text{т} + 3{,}27 \text{ МэВ} \end{cases} $$

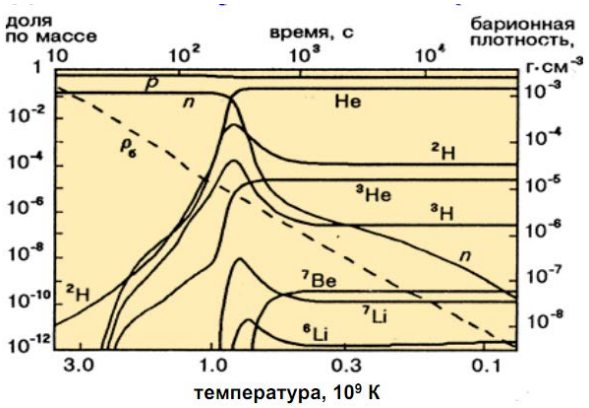


Рисунок 213. Нуклеосинтез: образование легчайших ядер.

Дальше дейтрон объединяется с тритием, получается ${}^4_2He$

$$ {}^2_1H + {}^3_1H \rightarrow {}^4_2He + n + 17{,}59 \text{ МэВ} $$

Либо

$$ {}^2_1H + {}^3_2H \rightarrow {}^4_2He + p + 18{,}35 \text{ МэВ} $$

Температура понизилась, мы имеем между протоном и нейтроном сильное взаимодействие, они объединились, получился дейтрон, и дальше получаем ${}^4_2He$. На Рисунок 291 видно, что часть протонов уходит, объединившись с нейтронами, нейтронов свободных нет. 2 фактора: либо протоны их поглотили, либо нейтрон частица нестабильная и распадается на протон, электрон и нейтрино. Имеется в 1000 раз меньше ядер дейтерия. Но это важная цифра для нас. На этом этапе мы объяснили, как из протонов и нейтронов образуются ядра гелия 4 и объяснили соотношение 1/10.

Дальше предполагалось, что ${}^4_2He$ будет захватывать протоны, протоны между собой будут взаимодействовать, все будет идти к тяжелым ядрам. Но ничего подобного нет. Протон плюс протон получается ядро ${}^2He$. Кулоновское взаимодействие такую систему разрушает, такого ядра нет. Можно соединить протон и ${}^4_2He$, тогда получится ${}^5Li$ – это 4 частицы (2 протона, 2 нейтрона) сидят на уровне 1s1/2, а пятая частица должна сесть на следующий уровень - 1p3/2.

В такой яме, где всего оказывается 5 частиц, 1p3/2 оказывается выше края потенциальной ямы, такого ядра нет. Вся надежда была на гелий плюс гелий - бериллий 8. Бериллий 8- время жизни 10^{-8}с, объединились и распались. Все, Вселенная расширяется, и путей получать ядра тяжелее, чем гелий 4, на данном этапе у

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

нас нет. Кончился первичный нуклеосинтез. Вселенная охлаждается, расширяется. И мы имеем новый этап.

Если Вселенная охлаждается, то частицы во Вселенной начинают друг относительно друга двигаться медленнее. Если где-то во Вселенной буду иметь неоднородность, большую плотность, это вещество начинает падать на центр, частицы при этом они начинают разогреваться, так как скорость увеличивается. Они падают на центр. Вещество в центре начинает разогреваться. Плотность вещества увеличивается. Есть дейтерий там, его мало по отношению к протону, 10^{-3}, но ядро дейтерия очень слабо связано. Поэтому оно легко разрушается. При достаточно низкой температуре происходит следующее. Ядра дейтерия начинают между собой взаимодействовать, они разваливаются, и наряду с гравитационной энергией, которая стягивала вещество в центр, в центре зажглась реакция, дейтерий начал разрушаться. Это приводит к тому, что в центре появился источник тепла. Окружающие частицы, которые не успели свалиться на центр, начинают рассеиваться. Мы получаем объект – протозвезду. Дальше она начнет сжиматься.

Здесь в дело вступило гравитационное взаимодействие. Потому что масса вещества большая. Раньше мы говорили о взаимодействии протонов, нейтронов, электронов, там массы ничтожны. А здесь массы звезд, гравитационное взаимодействие вовсю работает.

Образование дейтерия. Протозвезда

Дейтерий образуется в реакции

$$p + n \to {}^{2}_{1}H + \gamma + 2{,}22 \text{ МэВ}$$

Отношение числа фотов к числу барионов $\frac{n_\gamma}{n_б} \approx 10^9 \div 10^{10}$

Образование дейтерия происходит, когда средняя кинетическая энергия частиц p + n уменьшается до 0,1 МэВ. Это соответствует примерно такой температуре T=$10^9 K$.

В центре протозвезды фиксировано образуется источник энергии. Дальше дейтерия мало, основное содержание массы, которая стягивается в звезду, - это гелий, водород. Водород – заряд 1, гелий – заряд 2. Поэтому стянуть 2 ядра гелия тяжелее (кулоновское взаимодействие), легче свести водород. Мы сводим водород. Нейтронов нет, протон взаимодействует с протоном, получается дейтрон, позитрон и нейтрино.

$$p + p \to d + e^+ + \nu \text{ (0,42 МэВ)}$$

Энергия, которая выделяется – 0,42 МэВ. Видите, нейтрино. Значит, этот процесс происходит в результате слабого взаимодействия. Средняя скорость реакции определяется величиной 5,8· 10^9 лет (это расчет для Солнца). Это слабый процесс:2 протона ударяются друг о друга 10^9 лет, и только один раз в 10^9 лет они объединяются, и получается дейтерий. Поэтому процесс идет очень медленно, он определяется слабым взаимодействием. Дейтрон, который получился, взаимодействует с протоном, получается ${}^3He$:

$$d + p \to {}^3He + \gamma(5{,}49 \text{ МэВ})$$

Скорость реакции$3{,}2\cdot 10^{-8}$ лет. Стоило преодолеть барьер слабой реакции, как появился дейтрон, он сразу взаимодействует со следуюзим протоном, появляется ^{3}He.

Дальше ^{3}He объединяется с ^{3}He, получается ^{4}He и 2 протона

$$^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + 2p \text{ (12,86 МэВ)}$$

Выделяется энергия (тепло) Q=24,7 МэВ. Это основная реакция, за счет чего светит Солнце.

α-процесс в звездах

Была протозвезда, она начала сжиматься, за счет гравитационной энергии в центре загорелся водород (Рисунок 214). Водород начинает гореть, в результате в центре начинает накапливаться гелий. Водород перемешается на периферию, а в центре начинает гореть гелий. Чтобы горел гелий, нужна более высокая температура. Потому что надо объединить 2 ядра, у которых Z=2, а у водорода Z=1. Температура должна быть $> 10^{8}K$. Два ядра гелия объединились, ^{4}He и еще одна α-частица, образовался ^{8}Be. Раньше мы говорили, что реакция дальше не шла, бериллий распадается за 10^{-16} с. Это было во Вселенной, которая расширялась. Но теперь плотность материи увеличилась, и за это время, пока ядро бериллия существует, 10^{-16} с, добавляется еще одна α-частица, получилось ядро ^{12}C, углерод. Мы это барьер 10^{-16} с преодолели. Получилось ядро ^{12}C. Нам с вами колоссально повезло. Если бы в ядре ^{12}C

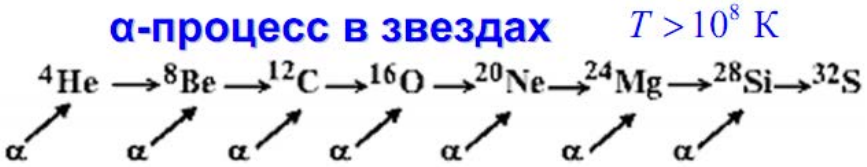


Рисунок 214. Альфа-процессы в звездах

не было бы уровня 7,65 МэВ, эта реакция не могла бы протекать. Потому что сечение реакции маленькое, и она протекает только потому, что здесь появляется резонанс. Резонанс на этой реакции приводит к тому, что мы перепрыгиваем ядро бериллия. Дальше ^{12}C захватывает α-частицу, появляется ^{16}O, ^{20}Ne, ^{24}Mg, ^{28}Si, ^{32}S. За счет таких реакций мы идем в сторону более тяжелых ядер. Те самые пики, которые мы видели, появляются потому, что добавляем по одной α-частице и идем в сторону более тяжелых ядер. Реакции:

$$^{4}He + {}^{4}He \rightarrow {}^{8}Be + {}^{4}He \rightarrow {}^{12}C^{*} \rightarrow {}^{12}C + \gamma$$

$$^{12}C + {}^{4}He \rightarrow {}^{16}O + 7{,}16 \text{ МэВ}$$

$$^{16}O + {}^{4}He \rightarrow {}^{20}Ne + 4{,}73 \text{ МэВ}$$

$$^{24}Mg + {}^{4}He \rightarrow {}^{28}Si + 9{,}98 \text{ МэВ}$$

$$^{28}Si + {}^{4}He \rightarrow {}^{32}S + 6{,}95 \text{ МэВ}$$

Все реакции идут с выделением энергии. Потихоньку звезда поджимается, и уже идут реакции образования более тяжелых ядер. Мы сместились в район серы 32.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Температура тут $10^9 - 10^{10}$ К. Плотность материи все время увеличивается, плотность звезды, и идут такие реакции. Но так как энергия достаточно большая. Ядро ^{12}C может столкнуться с ядром ^{12}C, ^{16}O с ядром ^{16}O, ^{12}C с ^{16}O, и потихоньку будем двигаться к более тяжелым ядрам.

Фотоядерные реакции в звездах

Но, как всегда, если есть избыток чего-то, то звезда начинает транжирить. Появилась высокая температура. Появились высокоэнергичные фотоны. Они начинают те ядра, которые у нас образовались, разрушать.

$$^{28}Si + \gamma \rightarrow \begin{cases} ^{24}Mg + \alpha - 9{,}98 \text{ МэВ} \\ ^{27}Al + p - 11{,}58 \text{ МэВ} \\ ^{27}Si + n - 17{,}18 \text{ МэВ} \end{cases}$$

Для того чтобы такая реакция протекала, звезда должна отдавать энергию, тратить на образование ядер $^{24}Mg, ^{27}Al, ^{27}Si$. На начальном этапе вещество сжималось, за счет гравитационной энергии повысилась температура, загорелись ядерные реакции, которые тоже идут с выделением энергии, дальше все это сжимается. Наконец температура повысилась настолько, что те самые фотоны, которые у нас были, начинают разрушать те элементы, которые мы создали, α-элементы начинают разрушаться. И в центре звезды начинают появляться α-частицы, протоны, нейтроны, которых там раньше не было.

Теперь у нас есть целая цепочка реакций. Есть реакция – нейтрон захватывается ядром, появляется гамма-квант. И ей противостоит реакция – гамма-квант захватывается ядром, а вылетает нейтрон. Есть реакции с образованием α-частицы, и есть реакции, когда α-частица наоборот разрушается, и так далее. Потихоньку идем от гелия двигаемся в область тяжелых ядер (хром, марганец, железо, кобальт никель и т.д.)

По мере того, как звезда сжималась, у нее появился источник энергии, который привел к тому, что образовались ядра железа внутри звезды. Мы достигли железного максимума. Этот этап в жизни звезды закончился.

В легких ядрах энергия выделяется, вплоть до железа, в реакциях синтеза. Железо – это ядро, которое имеет максимальную энергию связи. Дальше идет деление ядер. Образование в звезде железа приводит к тому, что образование энергии в звезде за счет синтеза закончилось.

У вас была звезда, которая первоначально состояла из двух типов ядер – водород, гелий. По мере того, как потихоньку все это сжигалось, образовалась звезда, которая называется предсверхновой. В центре – железо. Если имеем звезду с массой 25 масс Солнца, то примерно 0,5 массы Солнца в центре звезды состоит из железа, плюс немного нейтронов и гелия. По мере того, как мы отходим от центра звезды, появляются кремний, неон, магний. Потом появляется кислород, дальше появляется

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

гелий, углерод небольшое количество. Все это горело. Уходим на периферию звезды, и основными становятся водород и гелий.

Рисунок 214. Содержание элементов в предсверхновой

Был водород и гелий. В результате сжатия появился пирог: от железа до все более легких химических элементов, когда мы двигаемся к периферии. Мы дошли до железа. Дальше будет происходить вот что. Имеем нейтрон, у него нет кулоновского потенциального барьера, поэтому ядро может захватить нейтрон. Ядро железа ^{56}Fe захватило нейтрон, стало перегружено нейтронами, ^{57}Fe. Оно в результате β^-распада повышает свой заряд на 1. Дальше это стабильное ядро захватывает нейтрон и повышает свой заряд на 1.И так мы идем вдоль траектории s-процесса (slow – медленный). Медленный потому, что захватился нейтрон - произошел β^-распад и так далее. Потихоньку идем к тяжелым ядрам. Дохожу до области самых тяжелых стабильных ядер. Это изотопы свинца 208 и висмут 209. Дальше Z=83, 84, 85 нет стабильных изотопов, все радиоактивны. Таким образом, я объяснил, как с помощью медленного s-процесса, поглощая нейтроны, мы доходим до области тяжелых ядер.

Нейтроны для s-процесса

Вот реакции, в которых могут образовываться нейтроны подходящие нейтроны. Это ядро ^{13}C и α-частица. Стабильное ядро ^{12}C, заполненные оболочки, четно-четное ядро и один нейтрон висит сверху. Если добавляю α-частицу, отрываю нейтрон, и получаю хорошее плотное ядро^{16}O:

$$^{13}C + \alpha \rightarrow {}^{16}O + n$$

Вторая реакция – это ^{22}Ne плюс α-частица:

$$^{22}Ne + \alpha \rightarrow {}^{25}Mg + n$$

Если происходит совместное горение водорода и гелия (а это возможно, когда горение водорода переместилось наружу, а внутри горит гелий, одновременно снаружи имеется водород):

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

$$^{12}\mathrm{C} + p \rightarrow {}^{13}N + 1{,}94\ \text{МэВ}$$

$$^{13}N \rightarrow {}^{13}C + e^{+} + \nu_e + 1{,}20\ \text{МэВ}\ \left(T_{\frac{1}{2}} = 10\ \text{мин}\right)$$

$$^{13}\mathrm{C} + \alpha \rightarrow {}^{16}O + n + 2{,}22\ \text{МэВ}$$

Это реакции, в которыхобразуются нейтроны, которые идут потом для того, чобы образовать более тяжелые ядра.

Имеются ядра $^{13}\mathrm{C}$, ядра ^{13}N, но тут в дело могут вступать γ-кванты.

$$^{13}\mathrm{C} + \gamma \rightarrow {}^{12}\mathrm{C} + n - 4{,}95\ \text{МэВ}$$

$$^{13}N + \gamma \rightarrow {}^{12}N + n - 10{,}55\ \text{МэВ}$$

Эти реакци идут с поглощением энергии. Но энергии достаточно. Все во имя того, чтобы двигаться к более тяжелым ядрам.

Ядерные реакции синтеза в звездах различной массы

Когда такие реакции возможны? Ясно, что для того, чтобы сжать вещество, повысить температура, все будет зависеть от массы протозвезды, которая получилась.

Если масса звезды 0,08 массы Солнца, то никаких ядерных реакций нет: недостаточно энергии, чтобы сжать вещество, чтобы пошла реакция. Если масса звезды 0,3 массы Солнца, то может только гореть водород. Если 0,7 массы Солнца, то возможно горение водорода и гелия. Если масса 5 солнечных масс, то горит водород, гелий, углерод. Если масса большая, 25 масс Солнца, то все реакции синтеза с выделением энергии. Таким образом, в зависимости от того, какой массы звезда образовалась из этой протозвезды, будут протекать ядерные реакции. Но не все так просто.

Имеем звезду, которая имеет массу больше 25 масс Солнца (Рисунок 215).

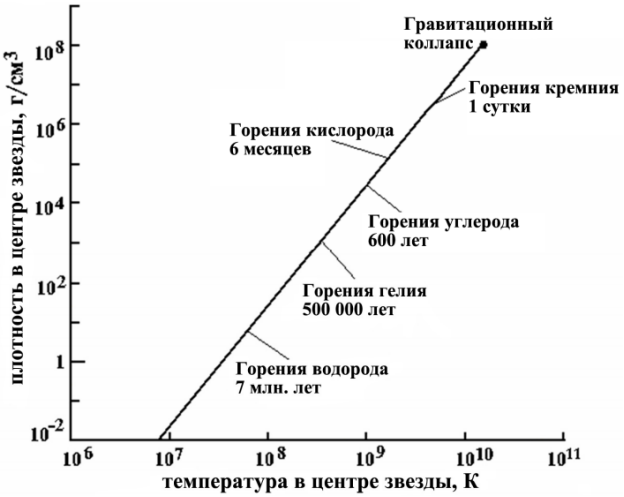


Рисунок 215. Эволюция массивной звезды.

По осям отложена температура в центре звезды и плотность вещества в центре звезды. Водород горит 7 млн. лет. Водород сгорел, в центре звезды начинается горение гелия, длится 500 тыс. лет. Потом начинается горение углерода, 600 лет. Дальше горение

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

кислорода – 6 месяцев. Потом горение кремния – 1 сутки. В течение суток в массивной звезде весь кремний и получается железо. Колоссальная звезда в течение суток весь кремний превращается в железо. Появляется железная сердцевина.
Дальше показана эволюция такой звезды (Рисунок 316).

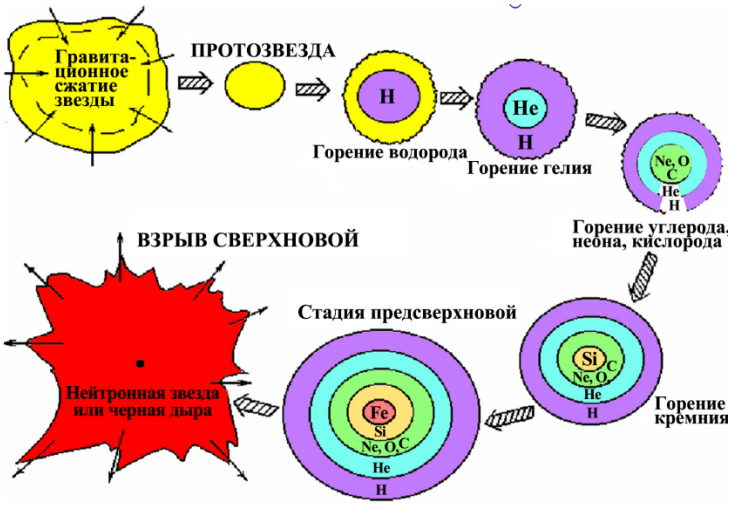


Рисунок 84. Эволюция массивной звезды.

Было гравитационное сжатие звезды, потом протозвезда, горение водорода, на периферии все спокойно, тепло переходит от центра к периферии. Далее горит гелий, на периферии горит водород. Дальше в центре горит неон, кислород, углерод, на периферии горит гелий, на самой крайней периферии горит водород. Дальше идет горение кремния в центре звезды, потом горение неона, кислорода и углерода, горение гелия и водорода. Наконец дошли до стадии, когда в центре звезды получилось железо. Сгорел водород, все остальные элементы сгорели. Имеется железо и большое количество γ-квантов. Начинается новый этап в жизни звезды. До сих пор все шло к тому, что появлялись все более тяжелые элементы. А теперь γ-кванты начинают разрушать то, что делала звезда. γ-квант взаимодействует с железом, приводит к тому, что ядро железа разрушается на 13 ядер гелия 4, на 13 α – частиц, плюс 4 нейтрона и используется энергия в 124,4 МэВ.

$$^{56}Fe \rightarrow 13\ ^{4}He + 4n - 124{,}4\ \text{МэВ}$$

Для того,чтобы эта реакция прошла, звезда должна потерять энергию в 124 МэВ. Центр звезды начинает охлаждаться. Это значит, что частицы, которые там были, они двигаются с меньшими скоростями. Они не могут обеспечить лостаточное давление, чтобы удержать звезду, а на периферии температура более высокая и более горячая периферия начинает давить на центр звезды, все это начинает схлопываться и происходит взрыв сверхновой звезды.
Есть еще одна реакция, которая имеет такие же последствия.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Нейтронизация вещества

Ядро, которое имеет характеристики (A,Z), захватывает электрон, в результате получается ядро с (A,Z-1) плюс нейтрино Протон захватывает электрон. Получается нейтрон и нейтрино:

$$(A,Z) + e^- \to (A, Z-1) + \nu_e$$
$$p + e^- \to n + \nu_e$$

Мы знаем, что сечение взаимодействия нейтрино с веществом очень маленькое, 10^{-44}см^2. Нейтрино начинает из звезды уходить. Они уходят и уносят с собой энергию. Мало того, что $\gamma -$ кванты уносят энергию, чтобы разрушать ядра, еще и нейтрино уносит энергию. В результате центр звезды охлаждается, на центр начинают падать внешние слои. Они сжимают звезду, происходит отскок и все вещество, которое было в звезде (происходит взрыв сверхновой), разбрасывается в окружающую среду. Был водород 90%, гелия 10%. Звезда переработала, образовались все элементы, вплоть до самых тяжелых, взорвалось, и все это выбросило на периферию. Чтобы представлять масштаб явления, в процессе такой эволюции примерно 40-80% вещества, которое было в звезде, выбрасывается в окружающее пространство. Таким образом, звезда сделала свое дело. Она образовала тяжелые элементы, взорвалась, выбросила все оболочки наружу.

Дальше со звездой происходит вот что. Должны быть какие-то силы, которые должны противостоять гравитационному взаимодействию. Таких сил две. Первая – в звезде есть электроны. Электронный газ, релятивистские электроны. Обычное вещество не сжимается потому, что имеется атомная структура, размер атома 10^{-8}см, и это равновесное состояние. Мы можем взять пресс и начать сжимать. Вот этот пресс – это гравитационное взаимодействие. Если я сжимаю так, что размер атома уменьшается примерно в 100 раз, вместо 10^{-8} становится 10^{-10} см, то электроны, которые занимают такой объем, могут удержать звезду. Появляется звезда, которая называется белый карлик. Это маломассивная звезда, которая существует за счет того, что электронный газ эту звезду держит. Такая звезда имеет массу примерно 1,4 массы Солнца. Если масса звезды оказалась больше, то теперь электроны удержать не могут. Они вжимаются в протоны и появляются нейтроны в центре звезды, нейтроны прижимаются друг к другу. Расстояние между нуклонами теперь 10^{-13}см. На меньших расстояниях ядерные силы начинают превращаться в силы отталкивания (вместо сил связи). Это приводит к тому, что образуется нейтронная звезда. В центре находятся нейтроны. Если масса звезды оказывается еще больше, то появляется ситуация, когда звезда превращается в черную дыру. Из черной дыры ничего наружу выйти не может, вторая космическая скорость должна быть меньше, чем скорость бросания света вылета из звезды.

Ядерные реакции в звездах.

Теперь мы знаем, что звезды могут быть звездами населения I и звездами населения II. Лучше запоминать так: звезды первого поколения – это звезды, которые формировались из водорода и гелия, и звезды последующих поколений – второго, третьего, четвертого, когда в окружающее пространство оказались выброшенными углерод, кислород и т.д. и эта смесь начинает сжиматься. Это звезды второго поколения, в которых содержание металлов по весу $< 0{,}01\%$. Солнце – это звезда второго поколения. На Солнце имеет реакцию горения водорода, это образование ^4He . Наряду с этим возможны реакции: ^3He плюс ^4He дают ^7Be и γ-квант. Эта реакция может идти сюда: ^7Be захватывает электрон, получается ^7Li. ^7Liможет захватить протон, опять появляется ^4He и ^4He. Есть еще ответвление: ^7Be захватывает протон, образуется ^8Bбор. Бор распадается на ^8Be. А ^8Be разваливается на 2 α-частицы:

$$^3He + {}^4He \rightarrow {}^7Be + \gamma \ (1{,}59 \text{ МэВ})$$
$$^7Be + e^- \rightarrow {}^7Li + \gamma + \nu \ (0{,}86 \text{ МэВ})$$
$$^7Li + p \rightarrow {}^4He + {}^4He \ (17{,}35 \text{ МэВ})$$
$$^7Be + p \rightarrow {}^8B + \gamma \ (0{,}14 \text{ МэВ})$$
$$^8B \rightarrow {}^8Be^* + e^+ + \nu \ (14{,}06 \text{ МэВ})$$
$$^8Be^* \rightarrow {}^4He + {}^4He \ (3{,}0 \text{ МэВ})$$

Такие реакции происходят на Солнце. Это первый класс реакций. Второй класс реакций – это реакции CNO-цикла (Рисунок 313). Если везде имеется углерод, то он может захватить протон, реакция pγ дает ^{13}N. Это радиоактивное ядро, оно распадается в результате β^+распада. Появляется ^{13}C, который захватывает протон и получается ^{14}N. ^{14}N захватывает протон и получается ^{15}O. Это радиоактивное ядро, оно распадается и появляется ^{15}N. ^{15}N захватывает протон, выбрасывает α-частицу и превращается в ^{12}C.

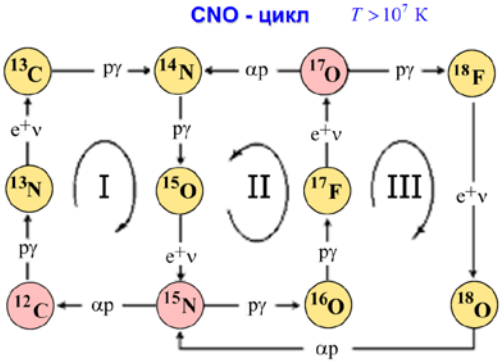


Рисунок 216. CNO-цикл

Из химии мы знаем, что это реакция катализа. Есть ядро ^{12}C, оно последовательно захватывает протоны, образуются α-частицы и снова образуется ядро ^{12}C. Возможны разные каналы реакции.

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Важно здесь, то, что образуются нейтрино. На нашем Солнце выделение энергии (Рисунок 217) за счет pp-цикла – такое, за счет CNO-цикла. Наше Солнце имеет температуру 15 млн. градусов. В основном реакция идет за счет pp-цикла, небольшая добавка за счет CNO-цикла.

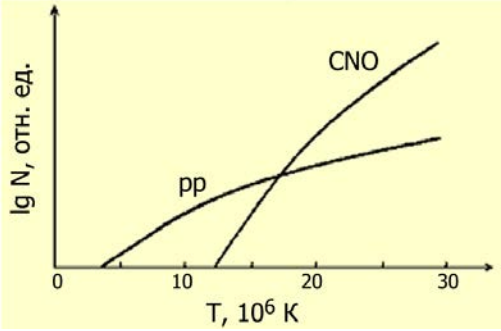


Рисунок 217. PP и CNO-циклы

γ-квант из центра Солнца до периферии идет миллионы лет, причем если он родился с энергией МэВ, то когда он выходит на периферию, то энергии кВ. Это видимый свет. Он теряет свою энергию. γ-кванты тут не помогут. Внутрь мы можем заглянуть только одним способом – посмотреть нейтрино, которое выходит. Есть солнечные нейтрино от основной цепочки протон плюс протон. Есть нейтрино от разных каналов реакций (Рисунок 303).

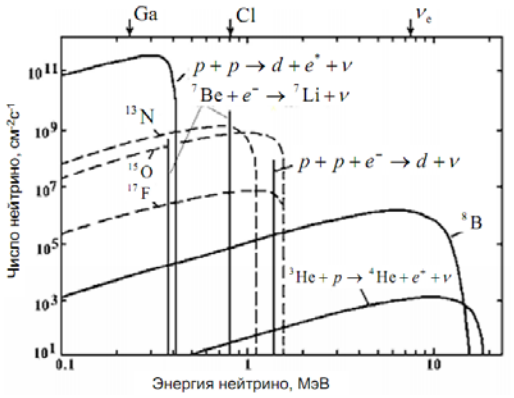


Рисунок 216. Солнечные нейтрино

Спектр нейтрино от 0,1 МэВ до 10-12 МэВ. Нужно эти нейтрино увидеть.
Создали детектор. Заполнили его 380 тыс. литрами раствора четыреххлористого углерода. Поместили детектор глубоко под землю, чтобы все другие частицы туда не попадали, и начал регистрировать нейтрино. Сначала нейтрино не видели, но потом поток нейтрино от Солнца оказался примерно в 2-3 раза меньше, чем предсказывала Стандартная солнечная модель. И выясняется, что поток от Солнца действительно меньше! Нейтрино электронные, которые образуются на Солнце, по дороге из центра Солнца, двигаясь через Солнце, пространство до Земли, превращаются в другие типы нейтрино: нейтрино мюонное и нейтрино тау, а детекторы эту реакцию не берут. Дэвис сделал 2 выдающихся открытия: зарегистрировал нейтрино от Солнца, из этих данных

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

последовало, что у нейтрино образуются осцилляции. А это возможно, если масса нейтрино не ноль, а некая маленькая величина. До сих пор мы не знаем, чему она равна. Но осцилляции нейтрино из одного типа в другой – это фундаментальнейший результат, который говорит о тои, что Стандартная модель, в которой мы работаем, и считаем, что масса нейтрино равна нулю, а самом деле требует расширения и введения новых параметров. Действительно, на Солнце происходят термоядерные реакции, мы их измерили.
Посмотрим на картинку (Рисунок 217).

Рисунок 217. Диаграмма Герцшпрунга-Рассела

Если взять все звезды, которые мы видим, то окажется, что они располагаются вдоль главной последовательности. Звезда сидит на главной последовательности, когда она сжигает водород, а это основное время жизни звезды. По мере того, как Солнце будет сжинать водород, она будет смещаться вправо, дальше она превратится в красный гигант. То есть в центре звезды будет гореть гелий, на периферии будет гореть водород. Солнце расширяется. Причем оно расширится так, что орбита Земли будет находиться внутри Солнца. Земля будет поглощена, Венера, Юпитер тоже окажутся внутри Солнца. После красного гиганта на звездах проходят вспышки, часть вещества выбрасывается, дальше Солнце превратится в белый карлик, он будет остывать и превратится в черный карлик. Если масса звезды большая, то она превратится в сверхновую, дальше превращается в нейтронную звезду или черную дыру. Такая эволюция звезд нас ожидает.

Ядерные реакции в звездах

- Горение водорода. CNO-цикл: $4p \rightarrow 4He + 2e^+ + 2\nu_e$
- Горение гелия: $3\alpha \rightarrow {}^{12}\mathrm{C}, {}^{16}O, {}^{20}Ne$

- α-процесс (добавляем $\alpha-$ частицы и идем в район железа). Образование α-частичных ядер: $A+\alpha+\alpha+\alpha+\cdots\rightarrow N\alpha-$ядра
- E-процесс. Образование яжер в районе железного максимума в условиях термодинамического равновесия.
- S-процесс- захват нейтронов происходит медленнее (slow), чем в β-распад в последовательности процессов (A,Z)+n$\rightarrow(A+1,Z)\rightarrow(A+1,Z+1)+e^{-}+\tilde{\nu}$

Во время взрыва элементы захватывают огромное количество нейтронов (15-20), сдвигаются на территорию r-процесса, процесс происходит в течение микросекунд, уходит далеко от долины стабильности, дальше образуется ядро, которое в результате β-распада движется по диагонали: А постоянно. В результате для тяжелых элементов есть 2 процесса: медленный захват нейтронов и быстрый захват нейтронов (когда звезда взрывается, происзодит в течение секунд). Звезда выбросила химические элементы в окружающую среду. Это есть причина появления космических лучей. Основные компоненты космических лучей – это водород, немного ядер гелия, кислорода, углерода, немного железа. Звезда выбросила в окружающее пространство это вещество, все пространство заполнено космическими лучами.

Космические лучи

Космические лучи вперые обнаружил Гесс. Когда космические лучи врываются в атмосферу Земли, в основном это протоны, ударяют по ядру ^{14}N, рождает π-мезоны, котрые распадается на 2 γ-кванта. Протон теряет часть энергии, превращается в протон с энергией в 2 раза меньше. Родился еще π^{+}-мезон, котрый распался на ν_{μ} и $\overline{\nu_{\mu}}$. Протон меньшей энергии бьет по другому ядру ^{14}N, дальше еще по ядру. Появлятся электроны, нейтрино, γ-кванты, π-мезоны, мюоны. Все это обрушивается на Землю, чтобы от него избавиться у Земли есть магнитное поле, которым она защищает нас от этого потока частиц.

На полюсах, где магнитное поле слабое, частицы, которые врываются в атмосферу Земли, вызывают свечение. В основном они отклоняются, на Землю приходят мало. Но есть проникающие частицы, мюоны. Поэтому, когда хотим поставить эксперименты с малым выходом, то лезем глубоко под землю, чтобы земля поглотила все эти частицы, которые падают на поверхность. Под действием космических лучей расщепляются ядра углерода и кислорода. Это приводит к тому, что появляются ядра лития, бериллия и бора. Тот самый маленький минимум образуется под действием космических лучей.

Радиоактивные семейства урана и тория

Посмотрим на N-Z диаграмму (Рисунок 218).

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

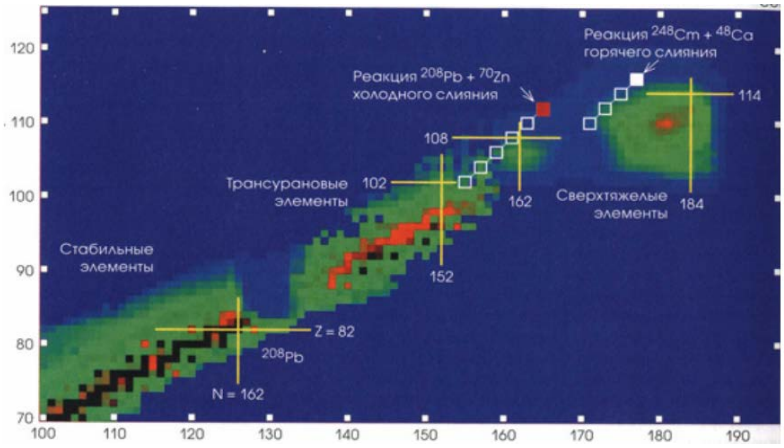


Рисунок 218. N-Z диаграмма атомных ядер

Черные точки – это стабильные ядра, красные – это радиоактивные ядра, β^+-радиоактивные, β^- – радиоактивные. Дальше имеется 2 изотопа урана ^{235}U, ^{238}U, изотоп тория. Изотоп ^{238}U живет $4{,}5 \cdot 10^9$ лет, ^{235}U живет $7 \cdot 10^8$ лет, изотоп тория живет $1{,}5 \cdot 10^{10}$ лет. Во время первичного нуклеосинтеза, во время взрыва сверхновой они образовались. Потом из них образовалась Земля, она захватила эти элементы. Дальше в земле они начали распадаться. Изотоп урана ^{235}U распадается быстрее, его меньше. Но за счет того, что ядра распадаются, это трансурановые элементы, мы имеем радиоактивные ядра.

Следующие радиоактивные ядра были получены в результате различных ядерных реакций, которые делает человек. Есть изотоп урана ^{235}U, направления α-распада и β-распада. Если имеется ^{235}U, то получаются все ядра от ртути до урана в результате α-распада и β-распада.

Трансурановые элементы

Дальше пытаемся понять, есть ли что-нибудь за ураном и торием? Берем уран ^{238}U, добавляем к нему нейтрон (Рисунок 219), получается ^{239}U, β-распад и получаются элементы 93 и 94. Дальше уран ^{238}U, облучаем его α-частицами, получаем 95-й элемент. Берем плутоний, облучаем его α-частицами, получаем ядро кюрия. Берем ядро америция, облучаем его α-частицами. Таким образом, доходим до 98-го элемента. В результате захвата α-частиц каждый раз заряд повышается на 2 единицы, и мы получаем новые и новые элементы.

Интересна судьба 100-го и 99-го элементов. Было взорвано термоядерное устройство в атмосфере, образовалось облако радиоактивных элементов в атмосфере, беспилотные самолеты пролетели через это облако, взяли образцы воздуха.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Z	Реакции, в которых были впервые обнаружены изотопы Z=93÷101
93, 94	$^{238}_{92}U + n \rightarrow {}^{239}_{92}U \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}_{93}Np \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}_{94}Pu$
95	$^{238}_{92}U + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{241}_{94}Pu + n,\ {}^{241}_{94}Pu \rightarrow {}^{241}_{95}Am + e^- + \overline{\nu}_e$
96	$^{239}_{94}Pu + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{242}_{96}Cm + n$
97	$^{241}_{95}Am + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{243}_{97}Bk + 2n$
98	$^{242}_{96}Cm + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{245}_{98}Cf + n$
99	$^{238}_{92}U + 15n \rightarrow {}^{253}_{92}U \xrightarrow{\beta^-} {}^{253}_{93}Np \cdots \xrightarrow{\beta^-} {}^{253}_{99}Es$
100	$^{238}_{92}U + 17n \rightarrow {}^{255}_{92}U \xrightarrow{\beta^-} {}^{255}_{93}Np \cdots \xrightarrow{\beta^-} {}^{255}_{100}Fm$
101	$^{253}_{99}Es + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{256}_{101}Md + n$

Рисунок 219. Трансурановые элементы

И получился изотоп фермия, Z=100. К эйнштейнию добавляем гелий, получили ядро менделевий. Эти ядра, 99 и 100, получили в результате взрыва термоядерной реакции, а последнее ядро получили под действием гелия. Но нет в достаточном количестве химических элементов, над которыми проводить реакцию. Тогда была придумана новая модель.

Сверхтяжелые элементы

Взяли ядро ^{208}Pb, облучили его ядрами ^{40}Ca, получили химический элемент, который имеет Z=102, - нобелий.

$$^{208}_{82}Pb + {}^{48}_{20}Ca \rightarrow {}_{102}No + xn$$

Взяли ядро ^{208}Pb, облучили его ядрами ^{62}Ni, получили элемент под номером 110 – дармштадтий.

$$^{208}_{82}Pb + {}^{62}_{28}Ni \rightarrow {}_{110}Ds + xn$$

В Дубне взяли ^{249}Ca, облучили его ядрами ^{40}Ca, и получили самое тяжелый элемент, который известен на сегодняшний день – 118.

$$^{249}_{98}Cf + {}^{48}_{20}Ca \rightarrow {}^{296}118 + 3n$$

В Дубне создана лаборатория, родоначальником ее был Флеров, который составил программу получения сверхтяжелых элементов, чтобы понять, как далеко мы можем пройти. Его ученик Оганесян продолжил эти исследования. Один из элементов называется флеровий, а самый тяжелый элемент – оганесон.

Те элементы, которые получили, живут очень мало. Они живут микросекунды, миллисекунды. Теоретические рассчеты говорят, что должен существовать остров стабильности, на котором могут быть элементы, которые живут $10^3 - 10^5$ лет. Но мы уже ушли по Z, и нужны ядра, сильно перегруженные нейтронами, чтобы попасть на этот остров. Нужна другая методика для идентификации этих элементов.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ ПРОФ РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ НА VK.COM/TEACHINMSU

Идентифицировать элементы по α-распадам мы можем, если периоды распадов секунды, микросекунды. Тут периоды распада очень большие.

Пучки радиоактивных ядер

Мы научились получать пучки радиоактивных ядер. Ускоряем эти пучки на ускорителях, бросаем на мишени и изучаем новую физику, которая соответствует тому, что ядра образуются вдали от долины стабильности. Здесь мы видим, что ядро ^{11}Li имеет структуру: ^{9}Li плюс 2 нейтрона. Нейтроны находятся очень далеко, это называется нейтронное гало. Ядро ^{11}Li имеет такой же размер, как тяжелое ядро свинца, за счет того, что эти нейтроны уходят очень далеко от атомного ядра. Нас интересует, как меняется оболочечная структура ядра в зависимости от того, как меняется отношение N к Z и отлично от долины стабильности. Интересует, какие сверхтяжелые элементы можем получить, как далеко можем продвинуться. Интересуют вопросы: если есть ядра, сильно перегруженные нейтронами, мы еще не сумели их открыть, то как они будут выглядеть? Будет ли это ядро, которое будет иметь N,Z близкое к стабильному ядру и дальше оно будет окружено нейтронной оболочкой? Или там будут кластеры из нейтронов? Спаривания, pn –спаривания, различные типы β-распадов, излучатели протонов.

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФОНД ВОЛЬНОЕ ДЕЛО
teach-in ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

ФИЗИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА

teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ