

Дата **16.06.2023.** Группа ХКМ 1/1. Курс 1

Дисциплина: Физика

Тема занятия: Физика атомного ядра

Цель занятия:

- *методическая* - совершенствование методики проведения лекционного занятия;
- *учебная* – сформировать представление об электрическом поле, рассмотреть его характеристики; сформулировать понятие физической величины «напряженность»; рассмотреть проводники и диэлектрики в электрическом поле;
- *воспитательная* – обучать учащихся соотносить полученные знания с наблюдаемыми явлениями.

Вид занятия: Лекция

Межпредметные связи:

Обеспечивающие: Техническая механика, Физика

Рекомендуемая литература

1. Мякишев Г.Я. Физика: учеб. для 10 кл. общеобразоват. организаций: базовый и углубл. уровни / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 9 изд., стер. – М.: Просвещение, 2022. – 432 с.: ил. – (Классический курс)
2. Мякишев Г.Я. Физика: учеб. для 11 кл. общеобразоват. организаций: базовый и углубл. уровни / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 10 изд., стер. – М.: Просвещение, 2022. – 432 с.: ил. – (Классический курс)
3. Рымкевич А.П. Задачник: сборник для учащихся общеобразовательных учреждений. – М., «Дрофа» 2008.

<https://yandex.ru/video/preview/3802746200072784824> Ядерные реакции

<https://yandex.ru/video/preview/1456963377430943512> Ядерные реакции

<https://yandex.ru/video/preview/17778151012706956809> Деление ядер урана

<https://yandex.ru/video/preview/13902320225267555122> Ядерный реактор

<https://www.youtube.com/watch?v=zVMbgHc-VVI> Ядерный реактор

<https://www.youtube.com/watch?v=9aVJXADwVTU> Элементарные частицы

Тема: Физика атомного ядра

1. Ядерные реакции
2. Деление ядер урана
3. Ядерный реактор
4. Элементарные частицы

1. Ядерные реакции

Атомные ядра при взаимодействиях испытывают превращения. Эти превращения сопровождаются увеличением или уменьшением кинетической энергии участвующих в них частиц.

Ядерные реакции

Ядерными реакциями называют изменения атомных ядер при взаимодействии их с элементарными частицами или друг с другом. Ядерные реакции происходят, когда частицы вплотную приближаются к ядру и попадают в сферу действия ядерных сил. Одноименно заряженные частицы отталкиваются друг от друга. Поэтому сближение положительно заряженных частиц с ядрами (или ядер друг с другом) возможно, если этим частицам (или ядрам) сообщена достаточно большая кинетическая энергия. Эта энергия сообщается протонам, ядрам дейтерия — дейтронам, α -частицам и другим более тяжелым ядрам с помощью ускорителей.

Для осуществления ядерных реакций такой метод гораздо эффективнее, чем использование ядер гелия, испускаемых радиоактивными элементами. **Во-первых**, с помощью ускорителей частицам может быть сообщена энергия порядка 10^5 МэВ, т. е. гораздо большая той, которую имеют α -частицы (максимально 9 МэВ). **Во-вторых**, можно использовать протоны, которые в процессе радиоактивного распада не появляются (это целесообразно потому, что заряд протонов вдвое меньше заряда α -частиц, и поэтому действующая на них сила отталкивания со стороны ядер тоже в 2 раза меньше). **В-третьих**, можно ускорить ядра более тяжелые, чем ядра гелия.

Первая ядерная реакция на быстрых протонах была осуществлена в 1932 г. Удалось расщепить литий на две α -частицы:

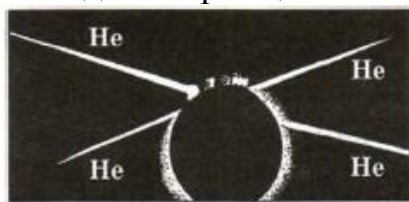
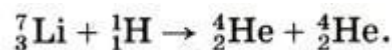


Рис. 13.12



Как видно из фотографии треков в камере Вильсона (рис. 13.12), ядра гелия разлетаются в разные стороны вдоль одной прямой согласно закону сохранения импульса (импульс протона много меньше импульса возникающих α -частиц; на фотографии треки протонов не видны).

Энергетический выход ядерных реакций

В описанной выше ядерной реакции кинетическая энергия двух образующихся ядер гелия оказалась больше кинетической энергии вступившего в реакцию протона на 7,3 МэВ. Превращение ядер сопровождается изменением их внутренней энергии (энергия связи). В рассмотренной реакции удельная энергия связи в ядрах гелия больше удельной энергии связи в ядре лития. Поэтому часть внутренней энергии ядра лития превращается в кинетическую энергию разлетающихся α -частиц.

Изменение энергии связи ядер означает, что суммарная энергия покоя участвующих в реакциях ядер и частиц не остается неизменной. Ведь энергия покоя ядра $M_{\text{я}}c^2$ согласно формуле (13.5) непосредственно выражается через энергию связи. В соответствии с законом сохранения энергии *изменение кинетической энергии в процессе ядерной реакции равно изменению энергии покоя участвующих в реакции ядер и частиц.*

Энергетический выход ядерной реакции

Энергетическим выходом ядерной реакции называется разность энергий покоя ядер и частиц до реакции и после реакции. Согласно вышесказанному энергетический выход ядерной реакции равен также изменению кинетической энергии частиц, участвующих в реакции.

Если суммарная кинетическая энергия ядер и частиц после реакции больше, чем до реакции, то говорят о выделении энергии. В противном случае реакция идет с поглощением энергии. Часть кинетической энергии (примерно $1,2 \cdot 10^6$ эВ) переходит в процессе этой реакции во внутреннюю энергию вновь образовавшегося ядра.

Выделяющаяся при ядерных реакциях энергия может быть огромной. Но использовать ее при столкновениях ускоренных частиц (или ядер) с неподвижными ядрами мишени практически нельзя. Ведь большая часть ускоренных частиц пролетает мимо ядер мишени, не вызывая реакцию.

2. Деление ядер урана

Делиться на части могут только ядра некоторых тяжелых элементов. При делении ядер испускаются два-три нейтрона и γ -лучи. Одновременно выделяется большая энергия.

Открытие деления урана

Деление ядер урана было открыто в 1938 г. немецкими учеными О. Ганом и Ф. Штрассманом. Они установили, что при бомбардировке урана нейтронами возникают элементы средней части периодической системы: барий, криптон и др. Однако правильное истолкование этого факта именно как деления ядра урана, захватившего нейтрон, было дано в начале 1939 г. английским физиком О. Фришем совместно с австрийским физиком Л. Мейтнер.

Захват нейтрона нарушает стабильность ядра. Ядро возбуждается и становится неустойчивым, что приводит к его делению на осколки. Деление

ядра возможно потому, что масса покоя тяжелого ядра больше суммы масс покоя осколков, возникающих при делении. Поэтому происходит выделение энергии, эквивалентной уменьшению массы покоя, сопровождающему деление.

При делении ядра энергия связи, приходящаяся на каждый нуклон, увеличивается на 1 МэВ и общая выделяющаяся энергия должна быть огромной — порядка 200 МэВ. Ни при какой другой ядерной реакции (не связанной с делением) столь больших энергий не выделяется.

Непосредственные измерения энергии, выделяющейся при делении ядра урана $^{235}_{92}\text{U}$, подтвердили приведенные соображения и дали значение ≈ 200 МэВ. Причем большая часть этой энергии (168 МэВ) приходится на кинетическую энергию осколков. На рисунке 13.13 вы видите треки осколков делящегося урана в камере Вильсона.

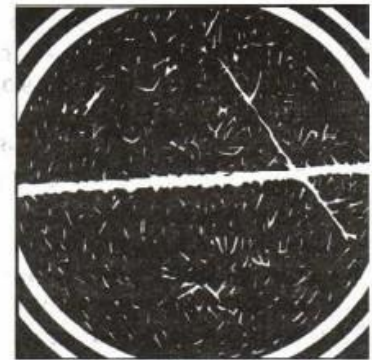


Рис. 13.13

Выделяющаяся при делении ядра энергия имеет электростатическое, а не ядерное происхождение. Большая кинетическая энергия, которую имеют осколки, возникает вследствие их кулоновского отталкивания.

Механизм деления ядра

Процесс деления атомного ядра можно объяснить на основе капельной модели ядра. Согласно этой модели сгусток нуклонов напоминает капельку заряженной жидкости (рис. 13.14, а). Ядерные силы между нуклонами являются короткодействующими, подобно силам, действующим между молекулами жидкости. Наряду с большими силами электростатического отталкивания между протонами, стремящимися разорвать ядро на части, действуют еще бóльшие ядерные силы притяжения. Эти силы удерживают ядро от распада.

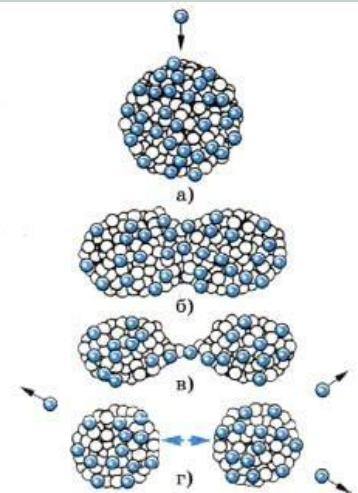


Рис. 13.14

Ядро урана-235 имеет форму шара. Поглотив лишний нейтрон, оно возбуждается и начинает деформироваться, приобретая вытянутую форму (рис. 13.14, б). Ядро будет растягиваться до тех пор, пока силы отталкивания между половинками вытянутого ядра не начнут преобладать над силами притяжения, действующими в перешейке (рис. 13.14, в). После этого оно разрывается на две части (рис. 13.14, г). Под действием кулоновских сил отталкивания эти осколки разлетаются со скоростью, равной $1/30$ скорости света.

Испускание нейтронов в процессе деления. Фундаментальный факт ядерного деления — испускание в процессе деления двух-трех нейтронов.

Именно благодаря этому оказалось возможным практическое использование внутриядерной энергии.

Реакция деления ядер сопровождается выделением энергии.

3. Ядерный реактор

Ядерным реактором называется устройство, в котором осуществляется управляемая реакция деления ядер.



Рис. 13.15

Ядра урана, особенно ядра изотопа $^{235}_{92}\text{U}$, наиболее эффективно захватывают медленные нейтроны. Вероятность захвата медленных нейтронов с последующим делением ядер в сотни раз больше, чем быстрых. Поэтому в ядерных реакторах, работающих на естественном уране, используются замедлители нейтронов для повышения коэффициента размножения нейтронов. Процессы в ядерном реакторе схематически изображены на рисунке 13.15.

Основные элементы ядерного реактора

На рисунке 13.16 приведена схема энергетической установки с ядерным реактором.

Основными элементами ядерного реактора являются: ядерное горючее ($^{235}_{92}\text{U}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$ и др.), замедлитель нейтронов (тяжелая или обычная вода, графит и др.), теплоноситель для вывода энергии, образующейся при работе реактора (вода, жидкий натрий и др.), и устройство для регулирования скорости реакции (вводимые в рабочее пространство реактора стержни, содержащие кадмий или бор — вещества, которые хорошо поглощают нейтроны). Снаружи реактор окружают защитной оболочкой, задерживающей γ -лучение и нейтроны. Оболочку делают из бетона с железным наполнителем.

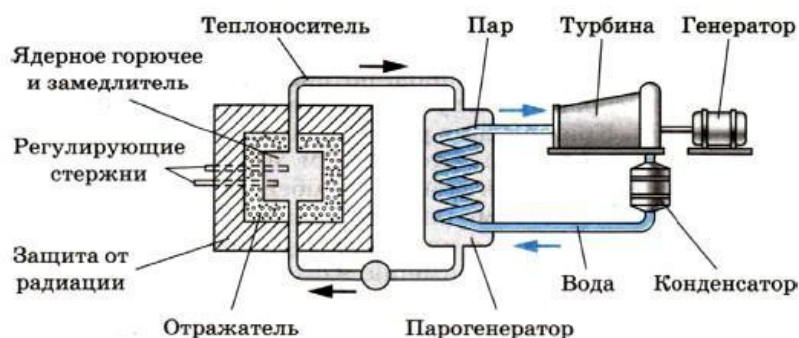


Рис. 13.16



Ферми Энрико (1901—1954) — великий итальянский физик, внесший большой вклад в развитие современной теоретической и экспериментальной физики. В 1938 г. эмигрировал в США. Одновременно с Дираком создал квантовую статистическую теорию электронов и других частиц (статистика Ферми — Дирака). Разработал количественную теорию β -распада — прототип современной квантовой теории взаимодействия элементарных частиц. Сделал ряд фундаментальных открытий в нейтронной физике. Под его руководством в 1942 г. впервые была осуществлена управляемая ядерная реакция.

Лучшим замедлителем является *тяжелая вода* (см. § 102). Обычная вода сама захватывает нейтроны и превращается в тяжелую воду. Хорошим замедлителем считается также графит, ядра которого не поглощают нейтроны.

Критическая масса

Коэффициент размножения k может стать равным единице лишь при условии, что размеры реактора и соответственно масса урана превышают некоторые критические значения. **Критической массой** называют наименьшую массу делящегося вещества, при которой еще может протекать цепная ядерная реакция.

При малых размерах слишком велика утечка нейтронов через поверхность активной зоны реактора (объем, в котором располагаются стержни с ураном).

С увеличением размеров системы число ядер, участвующих в делении, растет пропорционально объему, а число нейтронов, теряемых вследствие утечки, увеличивается пропорционально площади поверхности. Поэтому, увеличивая размеры системы, можно достичь значения коэффициента размножения $k \approx 1$. Система будет иметь критические размеры, если число нейтронов, потерянных вследствие захвата и утечки, равно числу нейтронов, полученных в процессе деления. Критические размеры и соответственно критическая масса определяются типом ядерного горючего, замедлителем и конструктивными особенностями реактора.

Для чистого (без замедлителя) урана $^{235}_{92}\text{U}$, имеющего форму шара, критическая масса примерно равна 50 кг. При этом радиус шара равен примерно 9 см (уран очень тяжелое вещество). Применяя замедлители нейтронов и отражающую нейтроны оболочку из бериллия, удалось снизить критическую массу до 250 г.

Курчатов Игорь Васильевич (1903—1960) — советский физик и организатор научных исследований, трижды Герой Социалистического Труда. В 1943 г. возглавлял научные работы, связанные с атомной проблемой. Под его руководством были созданы первый в Европе атомный реактор (1946) и первая советская атомная бомба (1949). Ранние работы относятся к исследованию сегнетоэлектриков, ядерных реакций, вызываемых нейтронами, искусственной радиоактивности. Открыл существование возбужденных состояний ядер с относительно большим «временем жизни».



Управление реактором осуществляется при помощи стержней, содержащих кадмий или бор. При выдвинутых из активной зоны реактора стержнях $k > 1$, а при полностью вдвинутых стержнях $k < 1$. Вдвигая стержни внутрь активной зоны, можно в любой момент времени приостановить развитие цепной реакции. Управление ядерными реакторами осуществляется дистанционно с помощью ЭВМ.

Реакторы на быстрых нейтронах

Построены реакторы, работающие без замедлителя на быстрых нейтронах. Так как вероятность деления, вызванного быстрыми нейтронами, мала, то такие реакторы не могут работать на естественном уране.

Реакцию можно поддерживать лишь в обогащенной смеси, содержащей не менее 15% изотопа $^{235}_{92}\text{U}$. Преимущество реакторов на быстрых нейтронах в том, что при их работе образуется значительное количество плутония, который затем можно использовать в качестве ядерного топлива. Эти реакторы называются *реакторами-размножителями*, так как они воспроизводят делящийся материал. Строятся реакторы с *коэффициентом воспроизводства* до 1,5. Это значит, что в реакторе при делении 1 кг изотопа $^{235}_{92}\text{U}$ получается до 1,5 кг плутония. В обычных реакторах коэффициент воспроизводства 0,6—0,7.

Первые ядерные реакторы

Впервые цепная ядерная реакция деления урана была осуществлена в США коллективом ученых под руководством Энрико Ферми в декабре 1942 г.

В нашей стране первый ядерный реактор был запущен 25 декабря 1946 г. коллективом физиков, который возглавлял наш замечательный ученый Игорь Васильевич Курчатов. В настоящее время созданы различные типы реакторов, отличающихся друг от друга как по мощности, так и по своему назначению.

Применение ядерной энергии

Ядерное оружие

Неуправляемая цепная реакция с большим коэффициентом увеличения нейтронов осуществляется в атомной бомбе.

Для того чтобы происходило почти мгновенное выделение энергии (взрыв), реакция должна идти на быстрых нейтронах (без применения замедлителей). Взрывчатым веществом служит чистый уран $^{235}_{92}\text{U}$ или плутоний $^{239}_{94}\text{Pu}$.

Чтобы мог произойти взрыв, размеры делящегося материала должны превышать критические. Это достигается либо путем быстрого соединения двух кусков делящегося материала с докритическими размерами, либо же за счет резкого сжатия одного куска до размеров, при которых утечка нейтронов через поверхность падает настолько, что размеры куска оказываются надкритическими. То и другое осуществляется с помощью обычных взрывчатых веществ.

При взрыве атомной бомбы температура достигает десятков миллионов кельвин. При такой высокой температуре очень резко повышается давление и образуется мощная взрывная волна. Одновременно возникает мощное излучение. Продукты цепной реакции при взрыве атомной бомбы сильно радиоактивны и опасны для жизни живых организмов.

Атомные бомбы применили США в конце Второй мировой войны против Японии. В 1945 г. были сброшены атомные бомбы на японские города Хиросима и Нагасаки.

В термоядерной (водородной) бомбе для инициирования реакции синтеза используется взрыв атомной бомбы, помещенной внутри термоядерной.

Нетривиальным решением оказалось то, что взрыв атомной бомбы используется не для повышения температуры, а для сильнейшего сжатия термоядерного топлива излучением, образующимся при взрыве атомной бомбы.

В нашей стране основные идеи создания термоядерной бомбы были выдвинуты после Великой Отечественной войны А. Д. Сахаровым.

С созданием ядерного оружия победа в войне стала невозможной. Ядерная война способна привести человечество к гибели, поэтому народы всего мира настойчиво борются за запрещение ядерного оружия.

4. Элементарные частицы

Три этапа в развитии физики элементарных частиц

В этой главе речь пойдет о частицах, которые нельзя разделить и из которых построена вся материя.

Вы уже более или менее знакомы с электроном, фотоном, протоном и нейтроном. Но что же такое элементарная частица?

Этап первый. От электрона до позитрона: 1897—1932 гг. (*Элементарные частицы — «атомы Демокрита» на более глубоком уровне.*)

Когда греческий физик Демокрит назвал простейшие нерасчленимые далее частицы атомами (слово атом, напомним, означает «неделимый»), то ему, вероятно, все представлялось в принципе не очень сложным. Различные предметы, растения, животные состоят из неделимых, неизменных частиц. Превращения, наблюдаемые в мире, — это простая перестановка атомов. Все в мире течет, все изменяется, кроме самих атомов, которые остаются неизменными.

Но в конце XIX в. было открыто сложное строение атомов и был выделен электрон как составная часть атома. Затем, уже в XX в., были открыты протон и нейтрон — частицы, входящие в состав атомного ядра. Поначалу на все эти частицы смотрели точно так, как Демокрит смотрел на атомы: их считали неделимыми и неизменными первоначальными сущностями, основными кирпичиками мироздания.

Этап второй. От позитрона до кварков: 1932—1964 гг. (*Все элементарные частицы превращаются друг в друга.*) Ситуация привлекательной ясности длилась недолго. Все оказалось намного сложнее: как выяснилось, неизменных частиц нет совсем. В самом слове *элементарная* заключается двоякий смысл. С одной стороны, элементарный — это само собой разумеющийся, простейший. С другой стороны, под элементарным понимается нечто фундаментальное, лежащее в основе вещей (именно в этом смысле сейчас и называют *субатомные частицы* элементарными).

Считать известные сейчас элементарные частицы подобными неизменным атомам Демокрита мешает следующий простой факт. Ни одна из частиц не бессмертна. Большинство частиц, называемых сейчас элементарными, не может прожить более двух миллионных долей секунды, даже в отсутствие какого-либо воздействия извне. Свободный нейтрон (нейтрон, находящийся вне атомного ядра) живет в среднем 15 мин.

Лишь частицы *фотон*, *электрон*, *протон* и *нейтрино* сохраняли бы свою неизменность, если бы каждая из них была одна в целом мире

(нейтрино лишено электрического заряда, и его масса покоя, по-видимому, равна нулю).

Но у электронов и протонов имеются опаснейшие собратья — *позитроны* и *антипротоны*, при столкновении с которыми происходит взаимное уничтожение этих частиц и образование новых.

Фотон, испущенный настольной лампой, живет не более 10^{-8} с. Это то время, которое ему нужно, чтобы достичь страницы книги и поглотиться бумагой.

Лишь нейтрино почти бессмертны, так как они чрезвычайно слабо взаимодействуют с другими частицами. Однако и нейтрино гибнут при столкновении с другими частицами, хотя такие столкновения случаются крайне редко.

Итак, в вечном стремлении к отысканию неизменного в нашем изменчивом мире ученые оказались не на «гранитном основании», а на «зыбком песке».

Все элементарные частицы превращаются друг в друга, и эти взаимные превращения — главный факт их существования.

Превращения элементарных частиц ученые наблюдали при столкновениях частиц высоких энергий. Представления о неизменности элементарных частиц оказались несостоятельными. Но идея об их неразложимости сохранилась. Элементарные частицы уже далее неделимы, но они неисчерпаемы по своим свойствам. Вот что заставляет так думать.

Пусть у нас возникло естественное желание исследовать, состоит ли, например, электрон из каких-либо других *субэлементарных частиц*. Что нужно сделать для того, чтобы попытаться расчленить электрон? Можно придумать только один способ. Это тот же способ, к которому прибегает ребенок, если он хочет узнать, что находится внутри пластмассовой игрушки, — сильный удар.

Разумеется, по электрону нельзя ударить молотком. Для этого можно воспользоваться другим электроном, летящим с огромной скоростью, или какой-либо иной движущейся с большой скоростью элементарной частицей. Современные ускорители сообщают заряженным частицам скорости, очень близкие к скорости света.

Что же происходит при столкновении частиц сверхвысокой энергии? Они отнюдь не дробятся на нечто такое, что можно было бы назвать их составными частями. Нет, они рождают новые частицы из числа тех, которые уже фигурируют в списке элементарных частиц. Чем больше энергия сталкивающихся частиц, тем большее количество частиц рождается. При этом возможно появление частиц с большей массой, чем сталкивающиеся частицы. Главное, что надо



Рис. 14.1

отметить, — это то, что всегда выполняется закон сохранения энергии.

На рисунке 14.1 вы видите результат столкновения ядра углерода, имевшего энергию 60 млрд эВ (жирная верхняя линия), с ядром серебра фотоэмульсии. Ядро раскалывается на осколки, разлетающиеся в разные стороны. Одновременно рождается много новых элементарных частиц — пионов. Подобные реакции при столкновениях релятивистских ядер, полученных в ускорителе, впервые в мире осуществлены в лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований в г. Дубне под руководством академика А. М. Балдина. Лишенные электронной оболочки ядра были получены путем ионизации атомов углерода лазерным лучом.

Возможно, конечно, что при столкновениях частиц с недоступной пока нам энергией будут рождаться и какие-то новые, еще неизвестные частицы. Но сути дела это не изменит. Рождаемые при столкновениях новые частицы никак нельзя рассматривать как составные части частиц-«родителей». Ведь «дочерние» частицы, если их ускорить, могут, не изменив своей природы, породить, в свою очередь, при столкновениях сразу несколько таких же в точности частиц, какими были их «родители», да еще и множество других частиц.

Итак, по современным представлениям, элементарные частицы — это первичные, неразложимые далее частицы, из которых построена вся материя. Однако неделимость элементарных частиц не означает, что у них отсутствует внутренняя структура.

Этап третий. От гипотезы о кварках (1964 г.) до наших дней. (Большинство элементарных частиц имеет сложную структуру.) В 60-е гг. возникли сомнения в том, что все частицы, называемые сейчас элементарными, полностью оправдывают это название. Основание для сомнений простое: этих частиц очень много.

Открытие новой элементарной частицы всегда составляло и сейчас составляет выдающийся триумф науки. Но уже довольно давно к каждому очередному триумфу начала примешиваться доля беспокойства. Триумфы стали следовать буквально друг за другом.

Была открыта группа так называемых странных частиц: К-мезонов и гиперонов с массами, превышающими массу нуклонов. В 70-е гг. к ним прибавилась большая группа частиц с еще большими массами, названных *очарованными*.

Кроме того, были открыты короткоживущие частицы с временем жизни порядка 10^{-22} — 10^{-23} с. Эти частицы были названы *резонансами*, и их число перевалило за двести.

Вот тогда-то (в 1964 г.) М. Гелл-Манном и Дж. Цвейгом была предложена модель, согласно которой все частицы, участвующие в сильных (ядерных) взаимодействиях, — *адроны* — построены из более фундаментальных (или первичных) частиц — *кварков*.

Кварки имеют дробный электрический заряд $+\frac{2}{3}e$ и $-\frac{1}{3}e$. Протоны и нейтроны состоят из трех кварков.

В настоящее время в реальности кварков никто не сомневается, хотя в свободном состоянии они не обнаружены и, вероятно, не будут обнаружены никогда. Существование кварков доказывают опыты по рассеянию электронов очень высокой энергии на протонах и нейтронах. Число различных кварков равно шести. Кварки, насколько сейчас известно, лишены внутренней структуры и в этом смысле могут считаться истинно элементарными.

Легкие частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях, называются *лептонами*. Их тоже шесть, как и кварков (электрон, три вида нейтрино и еще две частицы — мюон и тау-лептон с массами, значительно большими массы электрона).

Кварки и лептоны — истинно элементарные частицы.

Контрольные вопросы

1. Что называют энергетическим выходом ядерной реакции?
2. Что такое критическая масса?
3. Для чего в атомном реакторе используется замедлитель нейтронов?

Задание для самостоятельной работы:

1. Посмотреть видео !!!
2. Ознакомиться с лекционным материалом
3. Письменно ответить на контрольные вопросы
4. Фотографию прислать в личном сообщении ВК <https://vk.com/id139705283>

На фотографии вверху должна быть фамилия, дата выдачи задания, группа, дисциплина. Например: «Иванов И.И., **16.06.2023**, группа ХКМ1/1 «Физика»